

TESIS DOCTORAL

**INCENDIOS DE HIDROCARBUROS:
ESTUDIO DE LA FORMACIÓN Y
EVOLUCIÓN DEL
BOILOVER DE CAPA FINA**

Doctorando:
Fabio Ferrero

Director de Tesis:
Josep Arnaldos Viger

Barcelona, Marzo de 2006



4 **BOILOVER: PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS Y EFECTO SOBRE LA VELOCIDAD DE COMBUSTIÓN Y LA INTENSIDAD DE RADIACIÓN**

El presente capítulo está dedicado al análisis de las características principales del fenómeno del *thin layer boilover*. En primer lugar, se describe la manera en que se ha procedido a la identificación del fenómeno en los experimentos realizados. A continuación, una vez caracterizado el periodo del *thin layer boilover*, se determinan las siguientes propiedades del fenómeno

- tiempo transcurrido desde la ignición hasta su inicio,
- duración del fenómeno,
- combustible quemado hasta el comienzo del *thin layer boilover*,
- residuo no quemado al final de la prueba,
- cantidad de agua evaporada,
- intensidad de ebullición,
- intensidad de radiación

Finalmente, los resultados obtenidos se analizan en función de los parámetros característicos del incendio, es decir, el espesor de la capa inicial de combustible y el diámetro de la balsa

En la introducción y en el análisis bibliográfico de la presente tesis (apartados 1.3 y 2.4, respectivamente), se ha discutido sobre las dos tipologías del *boilover*. Por comodidad, a partir de este momento, se utilizará la palabra *boilover*, dando por supuesto, donde no sea expresamente especificado, que se trata del tipo de capa fina, ya que ésta es la situación en la cual se enmarcan los experimentos efectuados. Además, de forma general, se denominará período estacionario a dicho período sin *boilover*, mientras que al período estacionario con *boilover* se designará simplemente como *boilover*.

4.1 Identificación del fenómeno

Como se ha comentado anteriormente, el *boilover* va acompañado de un ruido típico, nombrado *crackling sound*, relacionado con la explosión de las burbujas de vapor que arrastran combustible hacia la llama (véase el apartado 1.3). Por lo tanto, el comienzo del fenómeno ha sido caracterizado a partir del nivel sonoro del incendio. La figura 4.1 muestra el diferente comportamiento del espectro sonoro para los dos combustibles utilizados, la figura (a) se refiere a la prueba FOC3_03_G3 (gasolina, 3 m de diámetro, 2 cm de espesor inicial de combustible), y la (b) a la prueba FOC3_04_D3 (gasóleo, 3 m de diámetro, 2 cm de espesor inicial de combustible).

Tal como puede verse en la figura 4.1, es evidente que solo en los incendios de gasóleo se ha experimentado un *boilover* y, además, que la identificación del instante del comienzo del fenómeno es sencilla e inmediata; se nota claramente que, en el fuego considerado, el *boilover* empieza aproximadamente a los 360 segundos desde el inicio de la combustión.

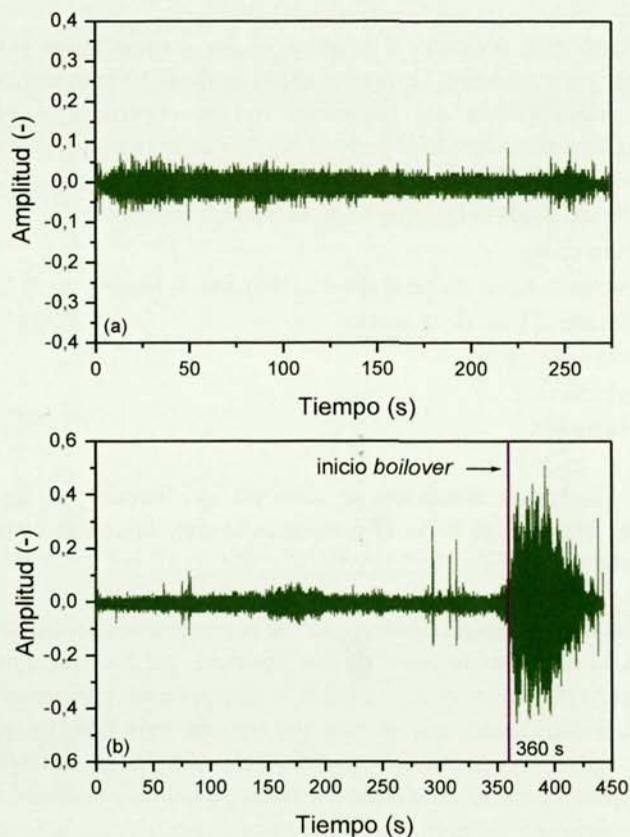


Figura 4.1. Evolución del nivel sonoro para un incendio de gasolina (a) y para uno de gasóleo (b).

Cabe indicar que, en algunos incendios de gasolina se registró, en los instantes finales de dichos incendios, un aumento del nivel sonoro; sin embargo, este incremento es mucho más limitado y no es atribuible a un *boilover*, sino a la esporádica evaporación de agua cuando, al final del incendio, parte de la misma queda descubierta por la desaparición del combustible y, por lo tanto, directamente expuesta a la llama.

La aparición del *boilover* se observa también en los gráficos donde se representa la evolución de la pérdida de peso en función del tiempo. Como puede verse en la figura 4.2, en el caso del gasóleo (b), se observa, en correspondencia del inicio del *boilover* —a los 360 segundos en el caso a estudio— un fuerte cambio de pendiente, debido a la

simultánea evaporación de agua y combustible. El cambio de pendiente no es visible en los incendios de gasolina (a).

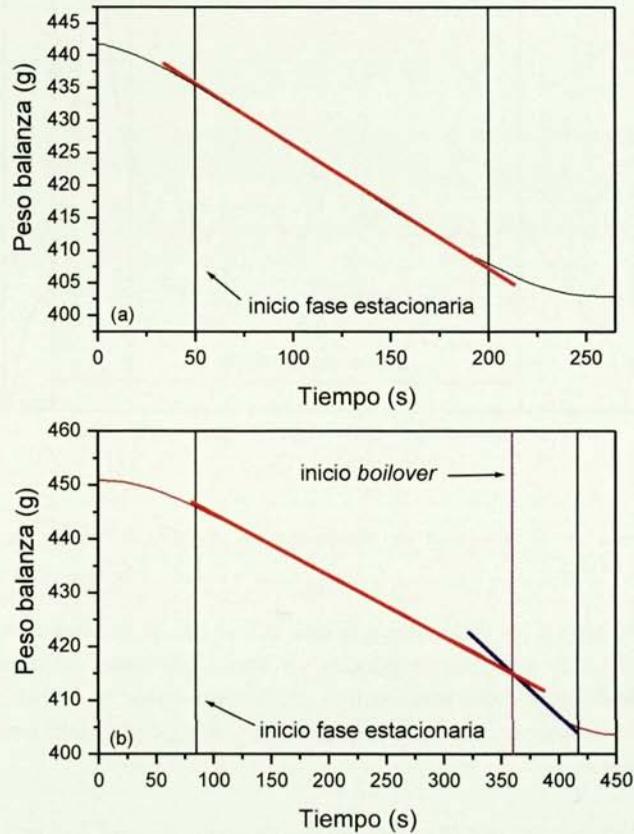


Figura 4.2. Evolución de la pérdida de peso total de líquido en función del tiempo para un incendio de gasolina (a) y para uno de gasóleo (b).

El cambio de la pendiente de la curva peso-tiempo se traduce en un aumento de la velocidad de combustión, como muestra la figura 4.3.

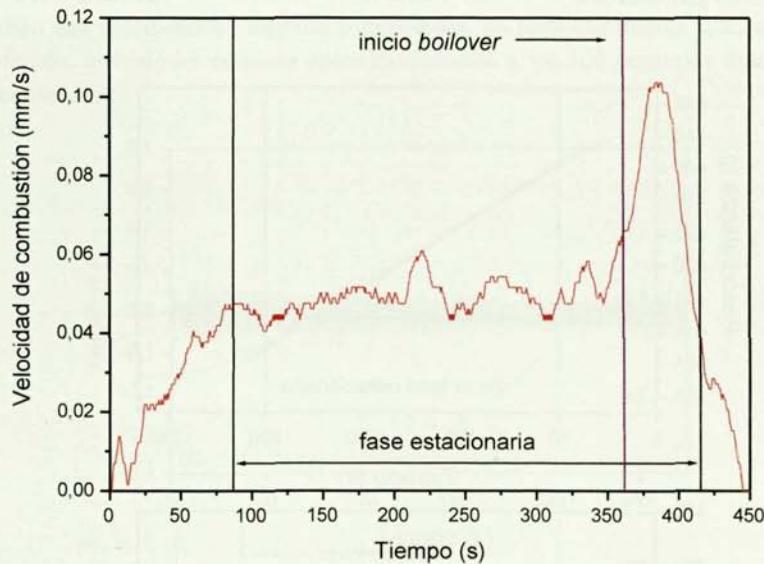


Figura 4.3. Evolución de la velocidad de combustión en función del tiempo para la prueba FOC3_04_D3.

Como se ha mostrado en los diferentes gráficos que se han presentado, los métodos de identificación del inicio del *boilover* pueden ser varios (aumento del nivel de sonido, cambio de pendiente en la curva peso-tiempo, etc.). Entre todos, se ha preferido utilizar el aumento del nivel sonoro, debido a su sencillez y mayor precisión para detectar el inicio del fenómeno.

Cabe nuevamente recordar, que la velocidad de combustión en el *boilover*, calculada a partir de los datos registrados por la balanza según lo explicado en el apartado 3.3.1, sobreestima la velocidad real de combustión, ya que incluye la contribución del agua que está evaporando. En el apartado siguiente, dentro del análisis de la intensidad de ebullición, se expone el procedimiento de cálculo utilizado para la obtención de la velocidad real de combustión.

4.2 Parámetros característicos

La tabla 4.1 resume las características de las pruebas realizadas, así como los valores de algunos parámetros que describen el *boilover*. Los valores se refieren a la última campaña experimental, obviamente para los incendios de gasóleo, ya que es el único combustible que ha presentado dicho fenómeno.

Tabla 4.1 FOC3 resultados experimentales

Experimento	D (m)	h_0 (mm)	t_b (s)	χ (%)	h_b (mm)
FOC3_22_D1.5	1,5	19,8	351	69,8	5,99
FOC3_01_D3	3	12,7	213	62,8	4,74
FOC3_02_D3	3	15,0	246	76,4	3,53
FOC3_04_D3	3	20,1	360	76,7	4,67
FOC3_05_D3	3	24,9	453	80,9	4,75
FOC3_18_D3	3	12,0	186	71,8	3,40
FOC3_20_D3	3	12,0	180	71,4	3,44
FOC3_14_D4	4	15,0	235	84,8	2,27
FOC3_15_D4	4	20,0	320	85,5	2,89
FOC3_16_D4	4	25,0	410	92,4	1,90
FOC3_09_D5	5	15,0	232	77,8	3,34
FOC3_10_D5	5	20,0	333	85,8	2,85
FOC3_11_D5	5	20,4	294	91,9	1,65
FOC3_07_D6	6	15,0	266	84,3	2,36
FOC3_12_D6	6	20,0	330	88,8	2,24

En los apartados sucesivos se discuten los resultados mostrados en la tabla anterior y otros datos que se presentarán en su momento.

4.2.1 Instante de inicio del *boilover*

En caso de situación accidental en que se contemple la posibilidad de aparición de *boilover*, es fundamental conocer el momento en el cual el fenómeno se manifestará. En la figura 4.4, se estudia la influencia del espesor inicial de combustible sobre dicho instante al variar el diámetro de la balsa, a partir de los datos experimentales de las últimas dos campañas experimentales. En la figura, también se muestran las rectas que representan las ecuaciones que se han determinado al correlacionar los datos experimentales, todas ellas con un coeficiente de correlación superior a 0,98. La tabla 4.2 muestra los valores de los parámetros a y b de las rectas de regresión, del tipo:

$$t_b = a \cdot h_0 - b \quad (4.1)$$

Tabla 4.2 Parámetros de las rectas de regresión de la figura 4.4

Diámetro (m)	a (s/mm)	b (s)
1,5	18,2	26,4
3	17,7	22,6
4	17,5	28,3
5	17,3	30,6

Nótese que las rectas de regresión no cruzan en el origen de los ejes, sino en un punto de la abscisa con un valor cercano a los 2 mm; esto constituye la confirmación gráfica

del hecho de que existe un valor mínimo de espesor inicial de hidrocarburo, por debajo del cual no puede ocurrir la combustión, como ya ha sido registrado por otros autores [PETT 1983, ALRA 1990, GAR1 1999]. Además, todas las rectas están muy próximas y, por lo tanto, se pueden correlacionar todos los datos experimentales en una sola ecuación:

$$t_b = 17,9 \cdot h_0 - 28,1 \quad (4.2)$$

donde t_b se expresa en s y h_0 en mm. El valor del coeficiente de correlación de 0,98 confirma la bondad de esta única ecuación, que comprende también los incendios de 6 m.

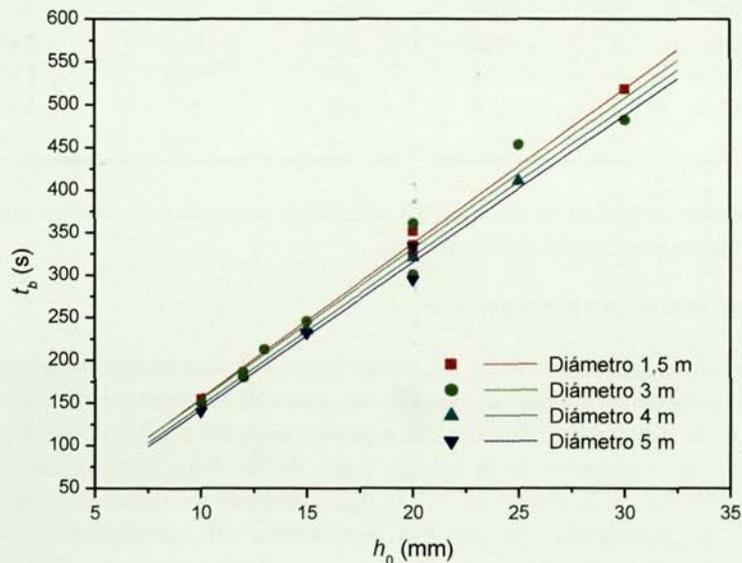


Figura 4.4. Instante del inicio del *boilover* en función del espesor inicial de combustible.

El gráfico anterior muestra que el instante del inicio del *boilover* aumenta linealmente con el espesor inicial de combustible, con un crecimiento menor cuanto más grande es el diámetro de la balsa. Los resultados concuerdan con estudios previos de Garo y Vantelon, los cuales obtuvieron los valores mostrados en la figura 4.5 [GAR1 1999]. En esta figura es mucho más evidente la disminución de la pendiente de las rectas de regresión; es decir, es mucho más alta la influencia del diámetro que en los experimentos realizados en esta tesis.

El motivo por el cual el *boilover* aparece siempre más tarde al aumentar el espesor inicial de combustible está relacionado con la transferencia de calor, cuanto más grande es dicho espesor más tiempo se necesita para que la interfase combustible-agua alcance

una temperatura suficientemente superior a la de ebullición del agua (aproximadamente 120 °C).

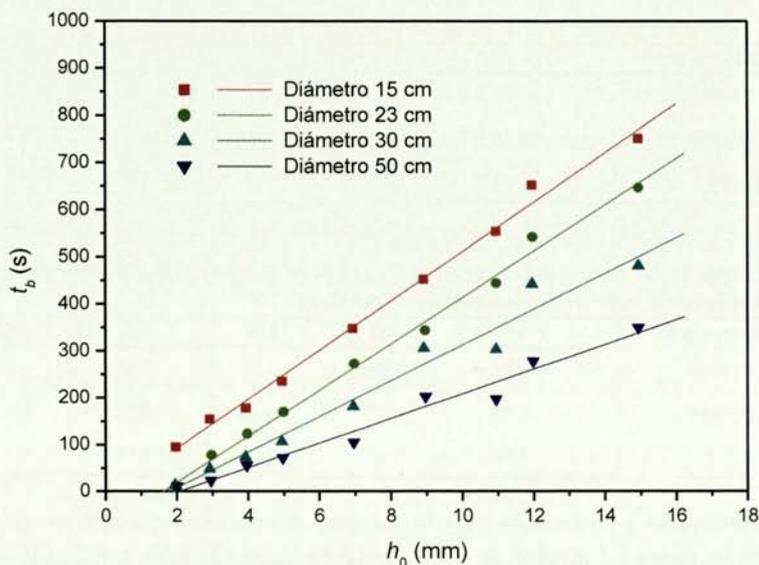


Figura 4.5. Instante del inicio del boilover según las pruebas experimentales de [GAR1 1999].

Por otro lado, el hecho de que las rectas de regresión presenten una disminución de su pendiente al aumentar el diámetro —en otras palabras, que a igual espesor el *boilover* se inicia antes para diámetros mayores—, está relacionado con el aumento de la velocidad con que se propaga el calor en la capa de líquido combustible (*thermal penetration rate*), lo cual es coherente con el aumento de la velocidad de combustión con el diámetro de la balsa. Esto comporta un consumo más rápido de la capa de combustible y una mayor producción de calor, haciendo que el agua requiera menos tiempo para alcanzar la temperatura de ebullición. Sin embargo, como se muestra en el ANEXO I, la velocidad de combustión, a partir de ciertos diámetros, crece cada vez menos al aumentar dicho diámetro, esto explica la menor disminución de la pendiente de las rectas al ir aumentado este parámetro y las diferencias entre las dos series de experimentos.

Para probar numéricamente el razonamiento anterior, se han calculado las pendientes de las rectas de regresión de los datos de Garo y Vantelon (tabla 4.3), y se han comparado con los resultados obtenidos en esta tesis (tabla 4.4). En las tablas se presentan los valores de los inversos de la pendiente; dichos datos indican lo rápido que el calor se está moviendo en la capa de líquido y, por lo tanto, representan la velocidad de penetración del calor. Hay que hacer notar que dicha velocidad de penetración del calor es aparente (*apparent thermal penetration rate*, $\dot{y}_{e,a}$), y que la velocidad de penetración

real (*thermal penetration rate*, $\dot{y}_{c,r}$) se obtiene tras restar a la velocidad aparente de penetración la velocidad de combustión.

Tabla 4.3 Valores de las velocidades de penetración del calor aparente y real y de la velocidad de combustión obtenidos a partir de los datos de Garo y Vantelon [GAR1 1999]

Diámetro (cm)	15	23	30	50
$\dot{y}_{c,a} \cdot 10^2$ (mm/s)	1,9	2,4	2,7	3,5
$\dot{y}_{c,r} \cdot 10^2$ (mm/s)	0,9	1,3	1,4	1,8
$\dot{y} \cdot 10^2$ (mm/s)	1,0	1,1	1,3	1,7

Tabla 4.4 Valores de las velocidades de penetración del calor aparente y real y de la velocidad de combustión a partir de los resultados experimentales

Diámetro (cm)	150	300	400	500	600
$\dot{y}_{c,a} \cdot 10^2$ (mm/s)	5,51	5,66	5,71	5,80	5,40
$\dot{y}_{c,r} \cdot 10^2$ (mm/s)	0,81	-0,17	-0,34	-0,34	-0,77
$\dot{y} \cdot 10^2$ (mm/s)	4,70	5,83	6,05	6,14	6,17

Los valores presentados en las tablas anteriores confirman el razonamiento antedicho; la pendiente de las rectas (el inverso de $\dot{y}_{c,a}$) disminuye cada vez menos con el diámetro, de acuerdo con la evolución de la velocidad de combustión con este parámetro. La excepción para los incendios de 6 metros se debe probablemente al error experimental y al número limitado de pruebas.

En la tabla 4.4, también se muestra el valor de la velocidad de combustión obtenido a partir de la ecuación (A1.6). Se observa que, excepto para el caso de 1,5 m de diámetro, la velocidad de combustión es mayor que el valor del inverso de la pendiente de las rectas de regresión, esto significa que la velocidad de penetración del calor (*thermal penetration rate*) es más lenta que la velocidad con que el combustible está siendo consumido. Este hecho, que es opuesto a los resultados presentados por Garo y Vantelon al trabajar con diámetros menores, hace suponer que en los experimentos efectuados en esta tesis para diámetros superiores a 1,5 m no se produjo una onda de calor estable (*hot zone*), ya que si se hubiese producido este fenómeno, debido a procesos internos de destilación, el calor se hubiera propagado más rápidamente. En el análisis de la temperatura en el interior del líquido (capítulos 6 y 7) queda confirmada dicha hipótesis. La aparición de valores negativos —y por lo tanto, sin un sentido físico— para la velocidad de penetración real, se explica en parte por el error experimental y, en parte, por haber utilizado el dato de velocidad de combustión medio del periodo estacionario, desestimando la influencia del transitorio inicial.

Un resultado interesante es el que se obtiene al representar los valores de las tablas 4.3 y 4.4, y realizar una regresión de dichos datos (figura 4.6). Se observa que todos ellos

pueden correlacionarse con una sola curva, la cual muestra claramente el razonamiento anterior; es decir, que la influencia del diámetro se hace tanto más pequeña al aumentar el mismo. El resultado es aún más significativo si se tiene en cuenta que los experimentos de Garo y Vantelon se realizaron con un aceite térmico y los experimentos de esta tesis con gasóleo; entonces, se puede suponer que para todas las mezclas de hidrocarburos comprendidas entre estos dos extremos, la velocidad aparente de penetración del calor aparente $\dot{y}_{c,a}$ —coincidente con el inverso de la pendiente de las figuras 4.4 y 4.5— está regulada por la siguiente ecuación ($R = 0,99$):

$$\dot{y}_{c,a} = 0,056 \cdot (1 - e^{-2,2D}) \quad (4.3)$$

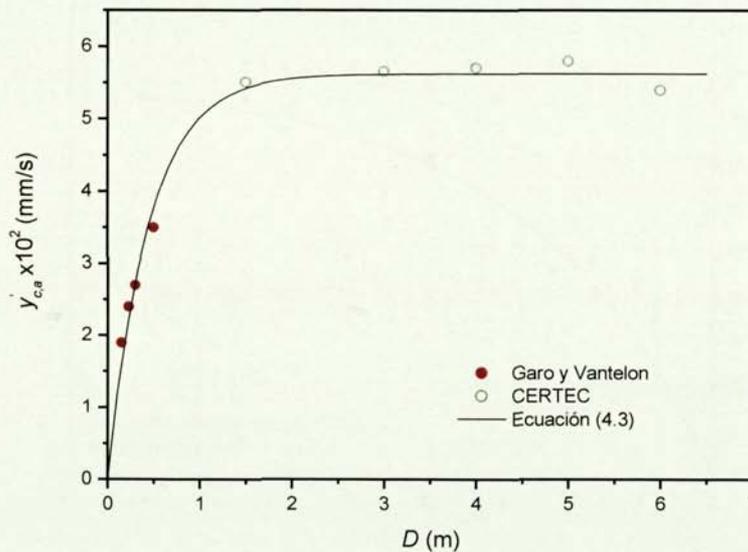


Figura 4.6. Velocidad aparente de penetración del calor en función del diámetro del incendio.

La ecuación (4.3) permite estimar la velocidad con la cual el calor es transferido a la interfase agua-combustible. Así mismo, para un determinado diámetro, multiplicando el valor de $\dot{y}_{c,a}$ por el grueso inicial de combustible, también puede calcularse el tiempo de inicio del *boilover*. De hecho, para los diámetros considerados en los experimentos de esta tesis —desde 1,5 hasta 6 m—, el valor de $\dot{y}_{c,a}$ es prácticamente constante. Eso concuerda con la obtención de una única ecuación de regresión para los datos experimentales del instante de inicio del *boilover* aquí determinados. Es obvio que el rango de aplicabilidad de la ecuación (4.3) se limita a espesores reducidos de hidrocarburos (*thin layer boilover*).

4.2.2 Porcentaje de combustible quemado hasta el inicio del *boilover*

Uno de los parámetros más importantes para la caracterización de un incendio en el cual aparece el fenómeno de *boilover*, es el porcentaje de combustible quemado hasta el inicio de dicho fenómeno con respecto a la cantidad inicial (*pre-boilover burned mass ratio*, χ). Su conocimiento proporciona información sobre la cantidad de hidrocarburo que queda por quemar y que, consecuentemente, puede ser proyectada al exterior de la balsa —o de un tanque en caso de situación accidental— durante el proceso de ebullición. En la figura 4.7, en la cual se han utilizado los datos obtenidos en las tres campañas experimentales, se representa la variable a estudio en función del espesor inicial de hidrocarburo.

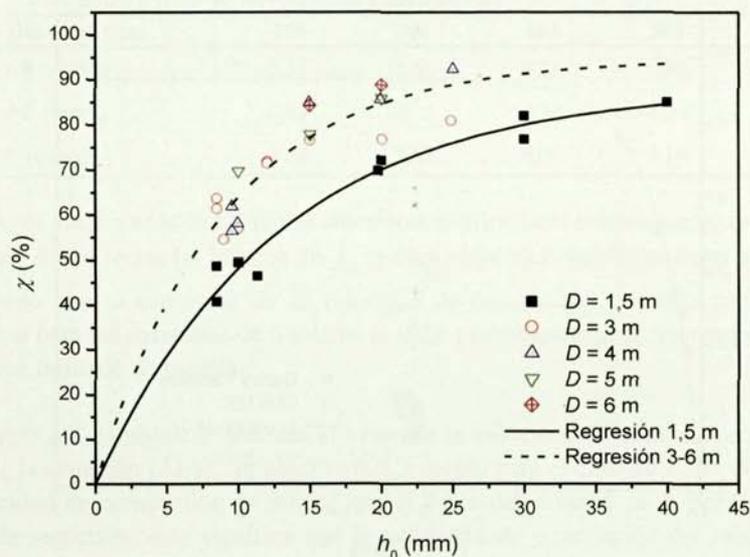


Figura 4.7. Porcentaje de combustible quemado hasta el inicio del *boilover* en función del espesor inicial de combustible.

Los resultados obtenidos muestran que la cantidad porcentual de combustible quemado hasta el inicio del *boilover* aumenta con el espesor inicial de combustible. Este comportamiento concuerda con lo observado por Garo y Vantelon; estos autores registraron en su experimentación el alcance de un valor máximo, aproximadamente igual al 50% del volumen inicial de combustible, para espesores iniciales superiores a los 10 mm [GAR1 1999], siendo dicho valor independiente del diámetro de la balsa. Como puede verse en la figura 4.7, en los incendios de gasóleo estudiados en esta tesis, el diámetro de la balsa si tiene influencia sobre la cantidad de combustible quemado antes del inicio del *boilover*, en el sentido que dicha cantidad es tanto mayor cuanto más grande es el diámetro del incendio. De hecho, a partir de los 3 m, concordante con el

alcance de una velocidad de combustión máxima, la influencia del diámetro se hace despreciable.

Por lo tanto, los incendios han sido divididos en dos grupos —los de 1,5 m de diámetro y los demás— y, para cada grupo los datos han sido correlacionados con una ecuación del tipo:

$$\chi = a(1 - e^{-bh_0}) \quad (4.4)$$

donde h_0 es expresado en mm. En la tabla siguiente se presentan los parámetros de las curvas de correlación, con los respectivos coeficientes de regresión.

Tabla 4.5 Parámetros de la ecuación (4.4)

Diámetro (m)	a (-)	b (mm ⁻¹)	R ²
1,5	88,31	0,079	0,96
3-6	94,29	0,113	0,83

Hay que notar que, respecto al estudio de Garo y Vantelon, el valor máximo se alcanza para espesores iniciales superiores a los 40 mm —contrariamente a los 10 mm de [GAR1 1999]— y, además, es siempre superior al 85-88% del volumen inicial, en vez del 50% indicado por los anteriores autores. Las diferencias se deben al tipo de combustible utilizado, que, como ya se ha indicado, en el caso del trabajo de Garo y Vantelon no era gasóleo, sino un aceite térmico, menos volátil y, por lo tanto, más difícil de quemar y, a la vez, a los distintos diámetros de las balsas, cuya influencia ya se ha detallado.

El alcance de un valor asintótico es coherente con el inicio del *boilover*, el cual se establece a una temperatura constante de la interfase combustible-agua y con los valores de velocidad aparente de penetración del calor ($\dot{y}_{c,a}$) y de la velocidad de combustión (\dot{y}).

4.2.3 Residuo no quemado al final de las pruebas

En la tabla siguiente se muestran los valores del residuo no quemado al final de cada prueba para los incendios de gasóleo (solo de la última campaña experimental, FOC3), expresados en litros y en porcentaje respecto al volumen inicial de combustible. Este dato es necesario porque se utiliza, como se explica en el apartado relativo a la intensidad de ebullición, para la estimación de la velocidad de combustión durante el *boilover*.

Excluyendo la influencia del espesor inicial de combustible, se han promediado los valores de porcentaje de residuo final para un mismo diámetro; dichos valores se muestran en la tabla 4.7. Como puede verse, el porcentaje de residuo final de

combustible no quemado —calculado como relación entre el volumen de residuo al final de la prueba y el volumen inicial V_0 — está comprendido entre un 2% y un 4%, con una cierta tendencia a aumentar con el diámetro. En experimentos de *boilover* de capa delgada con crudo, realizados en estudios previos [KOSE 1991], se han medido porcentajes de residuos del orden de 3 al 8%.

Tabla 4 6 Residuo final de combustible no quemado para las diferentes pruebas realizadas (FOC3)

Experimento	D (m)	h_0 (mm)	V_0 (l)	Residuo final (l)	Residuo final (%)
FOC3_22_D1.5	1,5	19,8	35	0,8	2,3
FOC3_01_D3	3	12,7	90	2,0	2,2
FOC3_02_D3	3	15,0	106	2,4	2,2
FOC3_04_D3	3	20,1	142	4,1	2,9
FOC3_05_D3	3	24,9	176	5,3	3,0
FOC3_18_D3	3	12,0	85	2,7	3,2
FOC3_20_D3	3	12,0	85	2,7	3,2
FOC3_14_D4	4	15,0	188	8,1	4,3
FOC3_15_D4	4	20,0	251	8,6	3,4
FOC3_16_D4	4	25,0	314	12,6	4,0
FOC3_09_D5	5	15,0	295	8,7	2,9
FOC3_10_D5	5	20,0	393	9,0	2,3
FOC3_11_D5	5	20,4	400	9,2	2,3
FOC3_07_D6	6	15,0	424	16,6	3,9
FOC3_12_D6	6	20,0	565	22,3	3,9

Tabla 4 7 Valores medios de porcentaje de residuo final para cada diámetro de incendio

Diámetro (m)	Residuo final (%)
1,5	2
3	2-3
4	3-4
5	2
6	4

4.2.4 Evaporación del agua

La cantidad de agua evaporada durante el *boilover* es un parámetro que no ha sido estudiado con detalle en estudios precedentes. Sin embargo, su conocimiento se hace imprescindible para una estimación correcta de la velocidad de combustión durante la fase de ebullición del agua. Además, el parámetro podría proporcionar información sobre el aumento de superficie específica de la llama en dicha fase.

Como se ha visto en el apartado 3.3.1, por el principio de los vasos comunicantes, se puede determinar la variación de nivel de combustible en la balsa, a partir de la correspondiente variación de peso registrado por la balanza según la siguiente ecuación:

$$\Delta h = \frac{\Delta W}{A_R \rho_f} = F_B \Delta W \quad (4.5)$$

Durante el *boilover*, la ecuación (4.5) no es directamente aplicable, ya que ΔW comprende también el agua que se está evaporando, es decir:

$$\Delta W_{Tot} = \Delta W_w + \Delta W_f \quad (4.6)$$

donde:

ΔW_w = variación de peso de la balanza debida a la evaporación del agua.

ΔW_f = variación de peso de la balanza debida a la evaporación del combustible.

Gracias a la linealidad del sistema, estas dos variaciones se pueden expresar mediante dos ecuaciones del tipo de la ecuación (4.5), una para el combustible (subíndice *f*) y otra para el agua (subíndice *w*):

$$\Delta h_f = \frac{\Delta W_f}{A_R \rho_f} = F_B \Delta W_f \quad (4.7)$$

$$\Delta h_w = \frac{\Delta W_w}{A_R \rho_w} = F_B \frac{\rho_f}{\rho_w} \Delta W_w \quad (4.8)$$

Conociendo el residuo de combustible no quemado al final de la prueba y el volumen al inicio del *boilover*, se conoce la cantidad de combustible quemada durante el *boilover* y, por lo tanto, al dividir por el área de la balsa, se determina Δh_f . A partir de la ecuación (4.7) se puede obtener el valor de ΔW_f . Por otro lado, ΔW_{Tot} se obtiene a partir de los gráficos de disminución del peso en función del tiempo, como diferencia entre el valor al comienzo del *boilover* y el valor al final del incendio. Esta cantidad así determinada incluye el residuo, contribución que se puede eliminar recurriendo nuevamente a la ecuación (4.7) introduciendo en Δh_f los milímetros correspondientes al residuo medido experimentalmente. Así, es posible determinar ΔW_w como diferencia entre ΔW_{Tot} y ΔW_f , según la ecuación (4.6). A partir de ΔW_w , y mediante la ecuación (4.8), es posible calcular la cantidad de agua evaporada, expresada en mm. Los resultados obtenidos en la última campaña experimental (FOC3) se muestran en la tabla 4.8. A parte de dos pruebas —en las cuales la evaporación de agua continuó después de finalizar la prueba debido a un gran calentamiento de las paredes de las balsas—, la cantidad de agua evaporada concuerda con la observación visual de disminución del agua en la balsa, al tomar como referencia la altura del termopar que queda fuera del líquido al final del

experimento, lo cual confirma la validez de la estimación aquí presentada. Promediando los resultados para un mismo diámetro, se observa que la cantidad de agua evaporada aumenta linealmente con el diámetro tal como muestra la figura 4.8.

Tabla 4.8 Cantidad de agua evaporada durante el *boilover* para cada una de las pruebas experimentales (FOC3)

Experimento	D (m)	h_0 (mm)	Agua evaporada (mm)
FOC3_22_D1.5	1,5	19,8	0,79
FOC3_01_D3	3	12,7	-
FOC3_02_D3	3	15,0	0,47
FOC3_04_D3	3	20,1	0,78
FOC3_05_D3	3	24,9	1,65
FOC3_18_D3	3	12,0	0,54
FOC3_20_D3	3	12,0	1,26
FOC3_14_D4	4	15,0	1,72
FOC3_15_D4	4	20,0	2,54
FOC3_16_D4	4	25,0	-
FOC3_09_D5	5	15,0	2,48
FOC3_10_D5	5	20,0	2,23
FOC3_11_D5	5	20,4	-
FOC3_07_D6	6	15,0	2,51
FOC3_12_D6	6	20,0	2,98

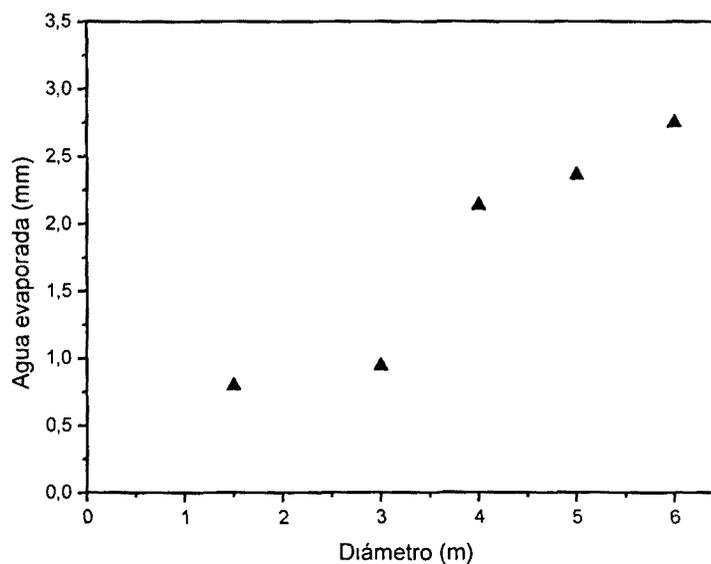


Figura 4.8 Cantidad de agua evaporada en función del diámetro de la balsa

Para calcular la velocidad media de evaporación del agua, es necesario determinar el tiempo en el cual ocurre el fenómeno. El comienzo del *boilover* se caracteriza, como ya se ha explicado, a partir del aumento de nivel sonoro; por lo tanto, se podría pensar en utilizar el mismo criterio para la elección del tiempo final. Sin embargo, en las últimas fases del incendio el espectro sonoro presenta una evolución más irregular, lo cual dificulta la elección de un instante preciso para el final del fenómeno (figura 4.1 (b)). Por esto, la obtención de este tiempo se ha realizado mediante los gráficos donde se representa la evolución de la velocidad de combustión y de la temperatura en el líquido (figura 4.9 (a) y (b)).

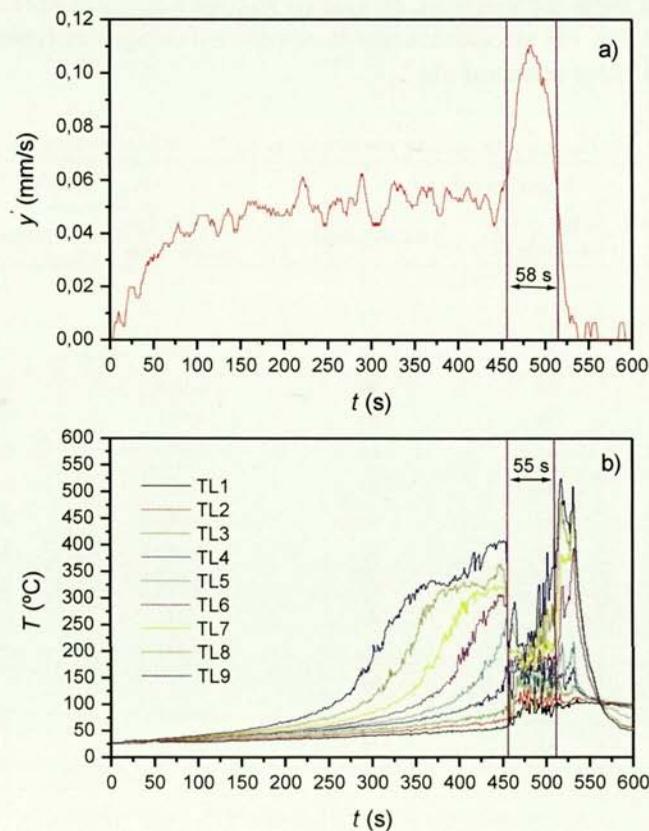


Figura 4.9. Identificación del tiempo total de duración del boilover durante la prueba FOC3_05_D3. (a) Evolución de la velocidad de combustión en función del tiempo. (b) Evolución de la temperatura en el interior del líquido en función del tiempo.

A partir de la velocidad de combustión (figura 4.9 (a)), se ha elegido como fin del *boilover* el instante en que dicha velocidad vuelve a tener el valor característico de la fase estacionaria. Mientras que, el criterio empleado al analizar la evolución de la temperatura en el interior del líquido (figura 4.9 (b)), ha sido identificar el instante final

como el momento en que la temperatura que miden todos los termopares que quedan fuera del líquido empieza a aumentar. Una explicación más exhaustiva se proporciona en el capítulo 6, dedicado específicamente al estudio del perfil de temperaturas en el interior del líquido. Como muestra la tabla 4.9, el tiempo de duración del *boilover* calculado con los dos métodos, en general, coincide.

Una vez caracterizada la duración del *boilover*, se divide la cantidad de agua evaporada por dicho tiempo y se obtiene la velocidad media de evaporación del agua. Este valor se resta a todos los puntos de la curva de velocidad de combustión en la fase de *boilover*, obteniéndose la velocidad real de combustión durante dicha fase. En la tabla siguiente se muestra, para todos los incendios de gasóleo realizados en la campaña FOC3, la duración del *boilover* y la velocidad media de evaporación del agua calculada mediante los métodos explicados anteriormente.

Tabla 4 9 Duracion del *boilover* y velocidad media de evaporación del agua

Experimento	Duración del <i>boilover</i> (s)		\dot{y}_{evap} (mm/s)	
	Velocidad de combustión	Termopares	Velocidad de combustión	Termopares
FOC3_22_D1.5	62	52	0,013	0,015
FOC3_01_D3	40	42	-	-
FOC3_02_D3	40	37	0,012	0,013
FOC3_04_D3	55	48	0,014	0,016
FOC3_05_D3	58	55	0,028	0,030
FOC3_18_D3	43	41	0,013	0,013
FOC3_20_D3	50	48	0,025	0,026
FOC3_14_D4	52	45	0,033	0,038
FOC3_15_D4	56	55	0,045	0,046
FOC3_16_D4	70	63	0,060	0,072
FOC3_09_D5	56	49	0,044	0,051
FOC3_10_D5	50	50	0,045	0,045
FOC3_11_D5	43	38	-	-
FOC3_07_D6	40	41	0,063	0,061
FOC3_12_D6	50	45	0,060	0,066

La duración del *boilover* presenta valores irregulares, sin evidenciar influencias específicas del diámetro del incendio o del espesor del combustible, debido a la elevada turbulencia del fenómeno. Lo único que se puede afirmar es que la duración está normalmente comprendida entre 40-60 segundos. Por las consideraciones efectuadas y debido a que no es posible definir de forma clara cual de los dos métodos es más preciso, se ha optado por utilizar el valor de duración medio entre las dos determinaciones.

Por lo que se refiere a la velocidad media de evaporación del agua, tampoco se observa que el espesor inicial de combustible tenga influencia sobre dicha velocidad. Sin embargo, promediando los valores obtenidos para el mismo diámetro, si puede verse una tendencia general al aumento de la evaporación del agua con el tamaño del incendio (figura 4.10). Además, dicha tendencia es lineal, como era de esperar según lo observado en la figura 4.8, y se ha correlacionado mediante la siguiente expresión ($R = 0,98$):

$$\dot{y}_{evap} = -0,0052 + 0,0106D \quad (4.9)$$

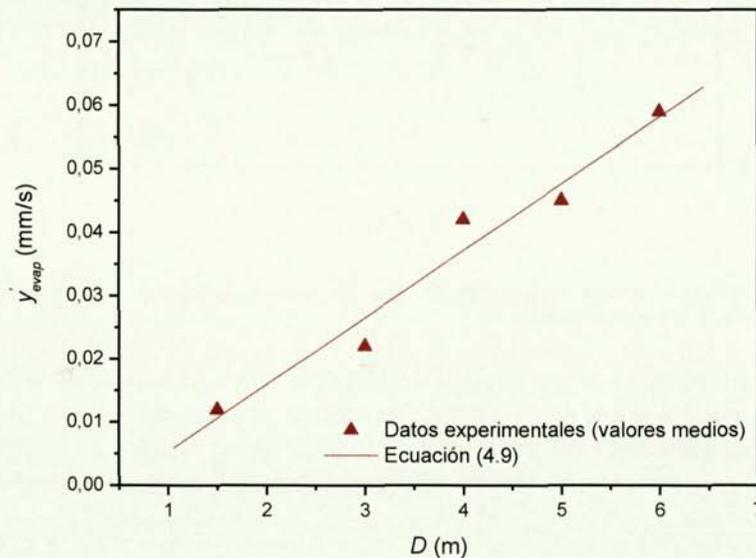


Figura 4.10. Velocidad media de evaporación del agua en función del diámetro del incendio.

Como ya se ha indicado, la velocidad de evaporación del agua no parece estar afectada por el espesor inicial del combustible. En cambio, si se observa una influencia de la cantidad de combustible sin quemar al inicio del *boilover*, en el sentido de que la evaporación del agua disminuye con dicho parámetro, tal como se muestra en la figura 4.11. En dicha figura, también se muestra la ecuación, obtenida mediante la correlación de los datos experimentales, que describe esta tendencia ($R = 0,8$):

$$\dot{y}_{evap} = 0,28 \cdot \exp(-h_b/1,19) + 0,015 \quad (4.10)$$

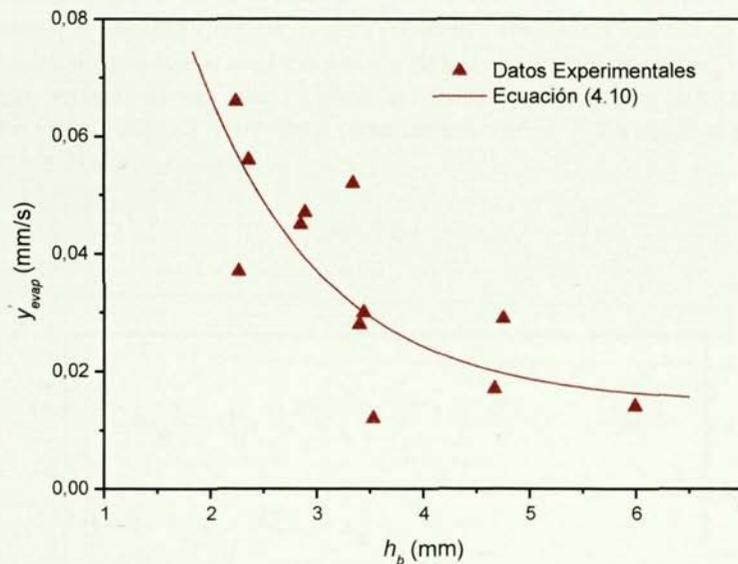


Figura 4.11. Velocidad media de evaporación del agua en función del espesor de combustible sin quemar al inicio del *boilover*.

El comportamiento descrito por la ecuación (4.10) se puede interpretar de la forma siguiente: un espesor mayor de combustible sin quemar al inicio del *boilover*, implica que una mayor parte del calor procedente de la llama queda retenido en la capa de combustible; en consecuencia, menos calor podrá llegar al agua, disminuyendo la evaporación de ésta.

Por otro lado, el espesor de combustible sin quemar al inicio del *boilover* se puede representar en función del diámetro del incendio. Como muestra la figura 4.12, este parámetro disminuye al aumentar el tamaño del incendio. Una vez más, este comportamiento se puede relacionar con la transferencia de calor en el líquido que regula a su vez la velocidad de combustión. Un aumento de la velocidad de penetración del calor aparente $\dot{y}_{c,a}$ con el diámetro comporta, además de alcanzar más rápidamente la ebullición del agua como ya se ha indicado anteriormente, un consumo más rápido de aquella capa de combustible (\dot{y} aumenta) que en el momento del inicio del *boilover* tenga un espesor menor. La figura 4.12 también muestra la correlación de los datos experimentales ($R = 0,87$). Esta correlación tiene la siguiente expresión:

$$h_b = 8,70 \cdot \exp(-D/2,37) + 1,50 \quad (4.11)$$

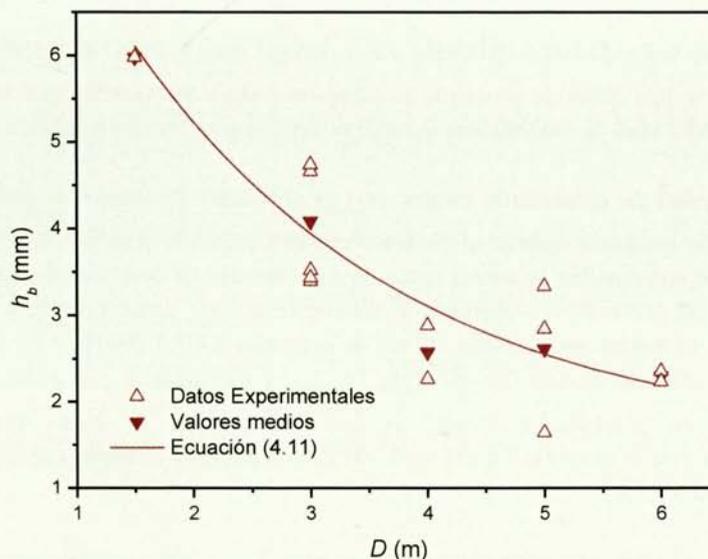


Figura 4.12. Espesor de combustible sin quemar al inicio del boilover en función del diámetro del incendio.

Por otro lado, al ser menor la cantidad de combustible sin quemar que queda al inicio del *boilover*, también resulta menor la cantidad que puede ser arrastrada hacia la llama durante esta fase. Por lo tanto, es razonable suponer que la intensidad de ebullición disminuirá con el diámetro del incendio. El análisis efectuado en el próximo apartado confirma esta hipótesis.

Cabe destacar que, debido al número limitado de pruebas y a los pequeños volúmenes iniciales involucrados, no ha sido siempre clara la dependencia entre el espesor residuo al inicio del *boilover* (h_b) y el espesor inicial de combustible (h_0). Sin embargo, en las pruebas de 3 m de diámetro, donde se disponía de más datos, ha sido posible observar una tendencia al aumento de h_b con h_0 .

4.2.5 Intensidad de ebullición

El efecto del *boilover* sobre la velocidad de combustión, se puede analizar definiendo el parámetro denominado intensidad de ebullición:

$$I_b = \left(\frac{m_b - m_s}{m_s} \right) \cdot 100 \quad (4.12)$$

La intensidad de ebullición expresa entonces el incremento (o la disminución) porcentual de la velocidad de combustión respecto al periodo estacionario.

Los valores de velocidad de combustión en el periodo estacionario (m_s) utilizados en este análisis se han obtenido mediante la ecuación (A1.6). En cambio, por lo que se refiere a la velocidad de combustión durante el *boilover*, se han utilizado dos valores distintos:

- Una velocidad de combustión media, $m_{b,media}$, obtenida dividiendo la cantidad de combustible quemada durante el *boilover* por el tiempo de duración de éste. Esta cantidad de combustible se estima restando a la cantidad de combustible sin quemar al inicio del fenómeno —obtenida directamente de los datos procedentes de la balanza—, el residuo no quemado al final de la prueba [CHA1 2001].
- Una velocidad de combustión máxima, $m_{b,maxima}$, calculada a partir del pico de velocidad de combustión durante el *boilover* después de haber restando la contribución de la evaporación del agua. De esta manera, se obtiene la intensidad de ebullición máxima.

La tabla 4.10 muestra, para cada valor del parámetro A (relación entre el espesor inicial de combustible y la superficie del incendio) [CHA2 2001], los valores de velocidad media y máxima de combustión durante el *boilover*, así como los valores de las correspondientes intensidades de ebullición.

Tabla 4.10. Velocidades media y máxima de combustión y sus correspondientes intensidades de ebullición durante el *boilover*.

Experimento	A (mm/m ²)	m_s (kg/m ² s)	$m_{b,media}$ (kg/m ² s)	$m_{b,maxima}$ (kg/m ² s)	$I_{b,media}$ (%)	$I_{b,maxima}$ (%)
FOC3_22_D1.5	11,21	0,047	0,089	0,113	89,48	139,81
FOC3_01_D3	1,80	0,060	0,111	-	86,53	-
FOC3_02_D3	2,12	0,060	0,080	0,108	33,89	80,64
FOC3_04_D3	2,84	0,060	0,074	0,084	24,54	40,88
FOC3_05_D3	3,52	0,060	0,069	0,074	15,72	23,25
FOC3_18_D3	1,70	0,060	0,070	0,108	17,42	80,14
FOC3_20_D3	1,70	0,060	0,061	0,077	2,41	28,96
FOC3_14_D4	1,19	0,062	0,031	0,066	-49,89	5,32
FOC3_15_D4	1,59	0,062	0,039	0,101	-36,81	61,74
FOC3_16_D4	0,002	0,062	-	-	-	-
FOC3_09_D5	0,77	0,064	0,052	0,061	-18,62	-4,28
FOC3_10_D5	1,02	0,064	0,048	0,055	-24,71	-13,03
FOC3_11_D5	1,04	0,064	0,028	-	-56,55	-
FOC3_07_D6	0,53	0,064	0,044	0,056	-30,61	-13,07
FOC3_12_D6	0,71	0,064	0,029	0,051	-54,55	-20,57

Como primer análisis, siguiendo el estudio realizado por Chatris *et al.* [CHA2 2001], se ha observado la variación de la intensidad de ebullición en función del parámetro propuesto por estos autores (A). En dicho estudio, se planteó la siguiente ecuación para estimar la intensidad de ebullición media en función de este parámetro:

$$I_b = 29,6A - 30,9 \quad (4.13)$$

La figura 4.13 compara los datos experimentales obtenidos en esta tesis con la ecuación (4.13). En primer lugar, en esta figura se observa una gran dispersión al representar dichos datos en función de A . En segundo lugar, aunque la intensidad de ebullición tiene un crecimiento inicial, más o menos, lineal con dicho parámetro tal como predice la correlación, también se observa que estos valores, sobretodo los de la intensidad media, son muy distantes de las predicciones realizadas por la ecuación de Chatris *et al.*, ya que por lo que parece esta ecuación se obtuvo a partir de valores de residuo de combustible sobrestimados (10%). Por último, esta ecuación lineal no predice que a valores grandes de A la intensidad parece adquirir un carácter asintótico, tal y como puede verse en la figura 4.13. De hecho, se observa una falta de datos en correspondencia con valores de A comprendidos entre 4 y 10 mm/m² y, por lo tanto, se requerirían experimentos en este intervalo. Sin embargo, se encuentran las siguientes dificultades prácticas para poder realizar dichos experimentos:

- Para fuegos con diámetro pequeño, los espesores necesarios podrían resultar tan pequeños que no permitirían la combustión o el alcance del estado estacionario.
- Para fuegos con diámetro grande, las cantidades de combustible involucradas serían exageradas y, además, los espesores podrían resultar tan grandes que generarían una situación de *hot zone boilover* y no de *thin layer boilover*.

Es evidente que, por todo lo dicho anteriormente, ni el parámetro A ni la ecuación en función del mismo explican de una forma totalmente satisfactoria el comportamiento de la intensidad de ebullición. Debido a ello, se ha creído conveniente encontrar un parámetro más significativo para explicar mejor el comportamiento de esta intensidad.

Como puede verse en la tabla 4.10, los resultados de intensidad de ebullición son muy dispersos, esto se debe a la turbulencia del fenómeno que dificulta la caracterización exacta de los periodos del incendio. Una diferencia de pocos segundos en la determinación del periodo del *boilover* puede comportar una variación notable en la velocidad de combustión en dicho periodo. Sin embargo, si se promedian los valores de estas intensidades para un mismo diámetro (tabla 4.11), se observa la tendencia mostrada en la figura 4.14; es decir, la intensidad de ebullición, media o máxima, disminuye con el diámetro, confirmando la hipótesis desarrollada en el apartado 4.2.4, a partir de la observación de la disminución del espesor de combustible sin quemar al inicio del *boilover* con el diámetro del incendio.

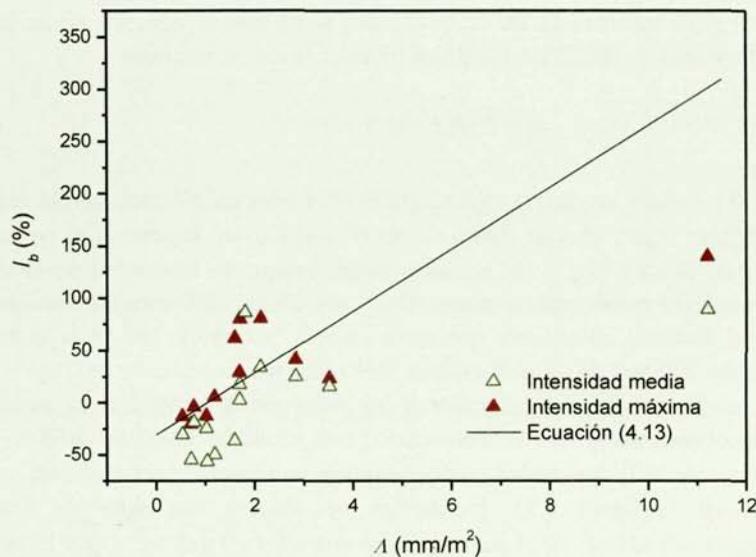


Figura 4.13. Intensidades de ebullición media y máxima en función de A .

Tabla 4.11. Valores medios de las intensidades de ebullición en función del diámetro.

Diámetro (m)	$I_{b,media}$ (%)	$I_{b,máxima}$ (%)
1,5	90	140
3	30	51
4	-50	34
5	-33	-9
6	-43	-17

La tendencia observada en la figura 4.14 concuerda con estudios previos ([KOSE 1991], [GAR1 1999]). Contrariamente a lo dicho por [GAR1 1999], en la experimentación realizada en esta tesis no ha sido posible observar ninguna tendencia clara en la variación de la intensidad de ebullición con el espesor inicial de combustible, probablemente debido a las menores variaciones porcentuales de dicho espesor respecto al diámetro en las pruebas aquí efectuadas.

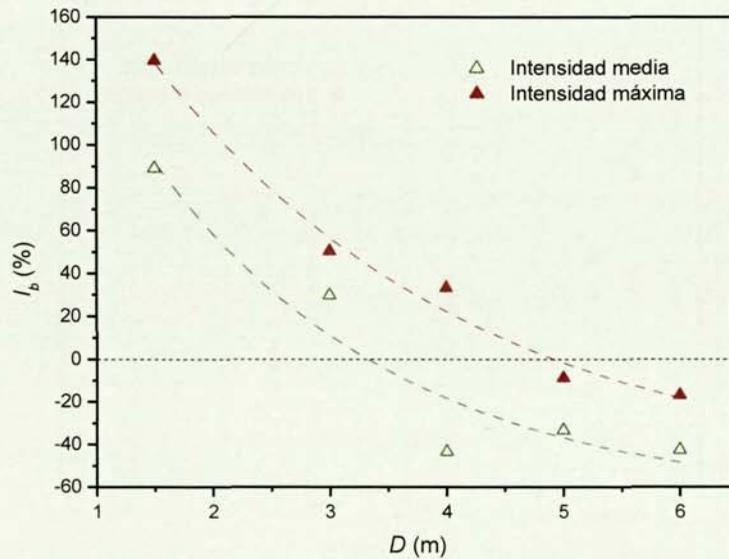


Figura 4.14. Intensidades de ebullición media y máxima en función del diámetro.

La figura 4.15 muestra como la intensidad de ebullición disminuye en función de la velocidad con que el agua se evapora. El resultado puede parecer ilógico, ya que una mayor evaporación de agua implica un mayor arrastre de combustible hacia la llama. Sin embargo, como ya se ha visto en el apartado precedente, la cantidad de combustible sin quemar al comienzo del *boilover* disminuye al aumentar las dimensiones de la balsa; por lo tanto, pese al aumento de la evaporación, debido a que queda una menor cantidad de combustible que puede ser arrastrada hacia la llama, la intensidad de ebullición no aumenta. Eso significa que el factor que limita lo intensa que será la ebullición es el espesor de combustible sin quemar al inicio del *boilover*, y no la velocidad con la cual dicha evaporación ocurre.

Por todo lo dicho, la cantidad de combustible sin quemar al inicio del *boilover* es el parámetro que determina la intensidad de ebullición. La representación de las dos intensidades en función del antedicho parámetro (figura 4.16), confirma la hipótesis planteada, observándose, además, la linealidad de esta intensidad con el mismo. En este caso, las correlaciones obtenidas para la intensidad media ($R = 0,92$) y la intensidad máxima ($R = 0,71$) en función de h_b son las siguientes:

$$I_{b,media} = -115,3 + 32,5 \cdot h_b \quad (4.14)$$

$$I_{b,máxima} = -70,6 + 30,1 \cdot h_b \quad (4.15)$$

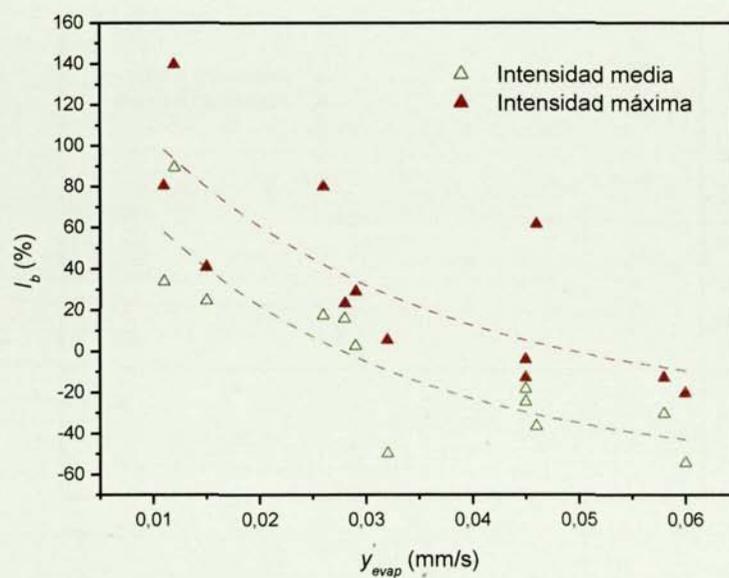


Figura 4.15. Intensidades de ebullición media y máxima en función de la velocidad de evaporación del agua.

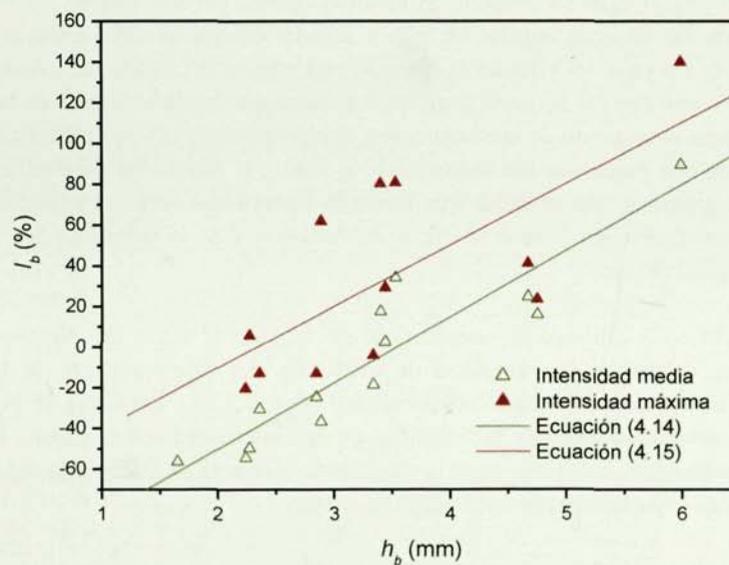


Figura 4.16. Intensidades de ebullición media y máxima en función del espesor de combustible sin quemar al inicio del boilover.

Para probar la solidez del razonamiento que ha llevado a pensar que h_b es el factor limitante, se ha introducido en las ecuaciones anteriores la ecuación (4.11), la cual expresa la evolución exponencial de h_b con el diámetro. Las ecuaciones así obtenidas son las siguientes:

$$I_{b,media} = -66,4 + 282,8 \cdot \exp\left(-\frac{D}{2,37}\right) \quad (4.16)$$

$$I_{b,máxima} = -25,3 + 262,1 \cdot \exp\left(-\frac{D}{2,37}\right) \quad (4.17)$$

En la figura 4.17 se muestra el buen ajuste de los datos experimentales (R mayor de 0,95) a las correlaciones (4.16) y (4.17), y se confirma la tendencia de la evolución de la intensidad de ebullición con el diámetro del incendio, ya observada en la figura 4.14.

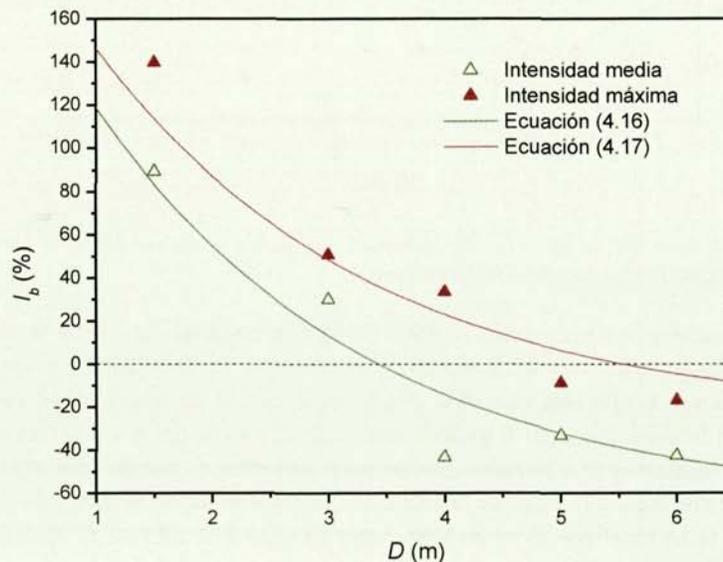


Figura 4.17. Intensidades de ebullición media y máxima en función del diámetro.

La figura 4.18 muestra los datos de intensidad máxima determinados en este trabajo y los obtenidos por Koseki en 1991 [KOSE 1991] en función del diámetro del incendio. Este autor realizó experimentos con crudo en balsas circulares de 0,6, 1 y 2 m, empleando un espesor inicial de 20 mm, y en una balsa cuadrada de 2,7 m de lado (diámetro equivalente 3,05 m), quemándose en este último caso 30 mm de combustible. En los experimentos de este estudio, los espesores están comprendidos entre 12 y 25 mm. No obstante la diferencia en los combustibles empleados, se nota cierta correspondencia entre las dos series de experimentos, hecho que induce a pensar que,

aunque con cierto error, los valores presentados pueden correlacionar de forma satisfactoria la intensidad de ebullición para un rango mayor de hidrocarburos, en el caso de *thin layer boilover*.

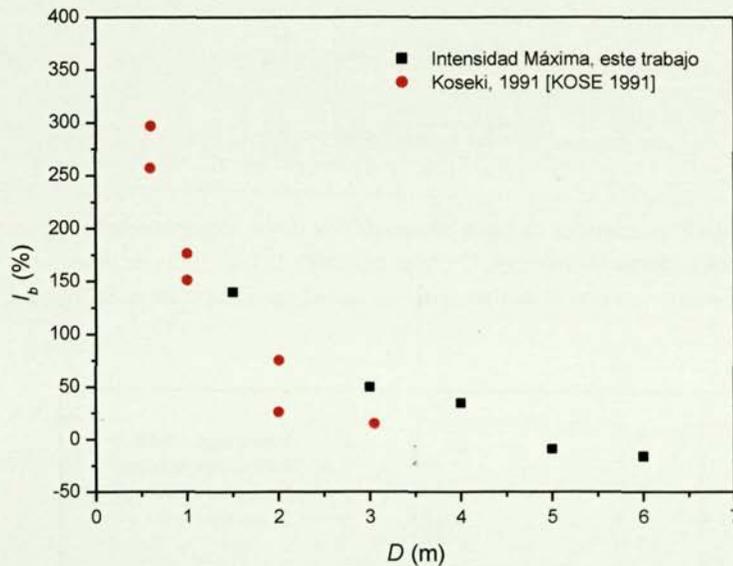


Figura 4.18. Comparación de los datos de intensidad máxima de ebullición obtenidos por Koseki [KOSE 1991] y los obtenidos en esta tesis.

Datos presentados por otros autores [GAR1 1999], han mostrado la misma tendencia a una fuerte disminución con el diámetro; sin embargo, la intensidad de ebullición alcanzaba valores mucho más elevados, con velocidades de combustión hasta 8 veces mayores en el *boilover* respecto al período estacionario. Eso se debió a dos factores: por un lado, los diámetros involucrados fueron muy pequeños y permitieron obtener un flujo de calor uniforme a lo largo de la balsa, hecho que con experimentos más grandes, y más reales, no se mantiene. Por otro lado, como ya se ha indicado anteriormente, en el antedicho trabajo se utilizó un aceite térmico, el cual es más difícil de quemar, hecho que implica un retraso en la aparición del *boilover* y un incremento en su peligrosidad, como los mismos autores indicaron.

4.2.6 Intensidad de radiación

La intensidad de ebullición utilizada, definida por la ecuación (4.12), ha mostrado como a partir de ciertos diámetros la velocidad de combustión en el *boilover* es menor que en el período estacionario. Esto podría, erróneamente, llevar a pensar que, en estas condiciones, la peligrosidad del *boilover* podría desaparecer. Con la finalidad de determinar si efectivamente lo antedicho puede ser cierto, es necesario evaluar el efecto

sobre la radiación desprendida por la llama, la cual, debido al aumento de la superficie específica del combustible durante la ebullición, podría crecer, pese a la disminución de la velocidad de combustión. Por lo tanto, se ha definido la intensidad de radiación durante el *boilover* como:

$$I_{b,rad} = \frac{\dot{q}_b}{\dot{q}_s} \quad (4.18)$$

El parámetro $I_{b,rad}$ —el cual ya ha sido utilizado en estudios previos realizados por otros autores [KOSE 1991, KOSE 1994, KOSE 2004]— expresa el aumento directo de la radiación desprendida al exterior y recibida por un objeto colocado a una cierta distancia del incendio durante la fase de *boilover* respecto a la radiación desprendida durante el periodo estacionario. Los flujos de calor se determinaron con dos radiómetros, tal como se ha descrito en el capítulo 3. Los valores de flujo de calor y de intensidad de radiación determinados en los experimentos se presentan en la tabla 4.12. Se indica también, para cada incendio, el valor medio de velocidad del viento para el periodo estacionario y el *boilover* (\bar{u}). El orden de magnitud de $I_{b,rad}$ es comparable con los datos que se pueden encontrar en [KOSE 1994], para una prueba con 30 mm de crudo como combustible.

Tabla 4.12. *Flyos de calor a diferentes distancias y la intensidad de radiación durante el boilover*

Experimento	D (m)	h_0 (mm)	h_b (mm)	x_c/D (-)	\dot{q}_s (kW/m ²)	\dot{q}_b (kW/m ²)	$I_{b,rad}$ (-)	\bar{u} (m/s)
FOC3_22_D1,5	1,5	19,8	5,99	5,00	1,61	3,07	1,91	0,75
FOC3_01_D3	3	12,7	4,74	3,00	3,53	6,46	1,83	1,95
FOC3_02_D3	3	15,0	3,53	5,00	1,01	1,77	1,75	1,56
FOC3_02_D3	3	15,0	3,53	5,00	1,04	1,81	1,74	1,56
FOC3_04_D3	3	20,1	4,67	5,00	1,05	2,39	2,27	0,19
FOC3_05_D3	3	24,9	4,75	5,33	1,27	2,39	1,88	0,46
FOC3_05_D3	3	24,9	4,75	7,33	0,47	1,08	2,30	0,46
FOC3_18_D3	3	12,0	3,40	3,00	4,86	7,42	1,53	1,16
FOC3_18_D3	3	12,0	3,40	5,00	1,30	2,42	1,86	1,16
FOC3_20_D3	3	12,0	3,44	3,00	4,08	7,11	1,74	0,54
FOC3_20_D3	3	12,0	3,44	5,00	2,90	5,50	1,89	0,54
FOC3_14_D4	4	15,0	2,27	3,00	3,11	4,82	1,55	0,73
FOC3_15_D4	4	20,0	2,89	3,00	4,74	6,13	1,29	1,35
FOC3_15_D4	4	20,0	2,89	5,00	1,49	1,91	1,29	1,35
FOC3_16_D4	4	25,0	1,90	3,00	3,12	6,43	2,06	1,12
FOC3_16_D4	4	25,0	1,90	5,00	1,15	2,13	1,86	1,12
FOC3_09_D5	5	15,0	3,34	3,00	2,48	3,81	1,54	0,60
FOC3_10_D5	5	20,0	2,85	3,00	3,31	5,13	1,55	1,71
FOC3_10_D5	5	20,0	2,85	5,00	0,97	1,43	1,47	1,71
FOC3_11_D5	5	20,4	1,65	3,00	4,01	5,07	1,26	1,73
FOC3_11_D5	5	20,4	1,65	5,00	1,21	1,53	1,26	1,73
FOC3_07_D6	6	15,0	2,36	3,00	2,21	3,52	1,59	0,78
FOC3_12_D6	6	20,0	2,24	3,00	2,46	3,83	1,55	0,68
FOC3_12_D6	6	20,0	2,24	5,00	0,80	1,17	1,46	0,68

Anteriormente, se ha determinado que el espesor residual de combustible al comienzo del *boilover* era el factor limitante de la intensidad de ebullición. Por lo tanto, en la figura 4.19 se representa la intensidad de radiación en función de dicho parámetro. Como para la intensidad de ebullición, la intensidad de radiación aumenta linealmente con el grueso de combustible al inicio del *boilover*. La ecuación (4.19) representa la recta de regresión —con coeficiente de correlación de 0,79— que expresa dicha tendencia:

$$I_{b,rad} = 0,98 + 0,21 \cdot h_b \quad (4.19)$$

Según la ecuación (4.11), el espesor de combustible al inicio del *boilover* decrece exponencialmente con el diámetro. Por lo tanto, teniendo en cuenta la ecuación (4.19), la intensidad de radiación debe decrecer con el tamaño de la balsa, hecho que se observa en los valores presentados en la tabla 4.12. Dicha tendencia también se puede encontrar, mediante cálculos sencillos, en [KOSE 2004].

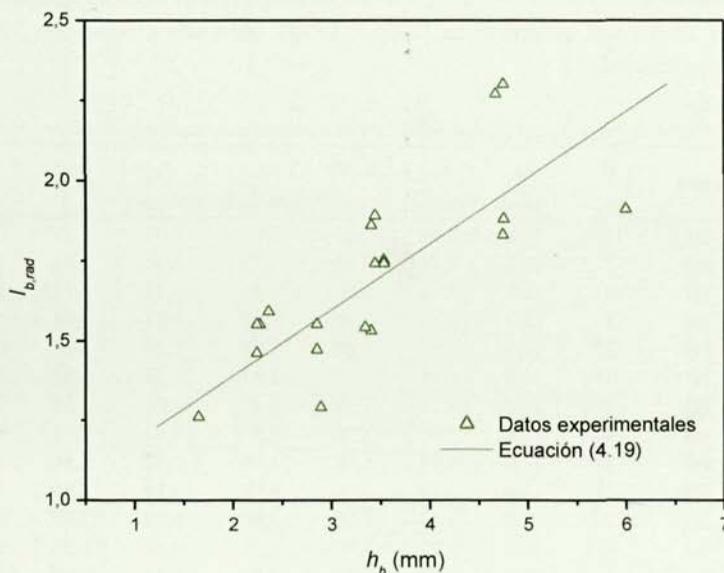


Figura 4.19. Intensidad de radiación en función del espesor de combustible al inicio del *boilover*.

Cabe destacar que la intensidad de radiación es, en el rango de datos examinados, siempre mayor de 1 y, por lo tanto, la radiación en el *boilover* es mayor que en el período estacionario, cualquiera que sea el diámetro de la balsa. Este resultado no es contradictorio con el hecho de que a partir de ciertos diámetros la velocidad de combustión es menor durante la fase de *boilover*, ya que la superficie específica del combustible durante dicha fase aumenta y la combustión es más eficaz. Por lo tanto, el

proceso genera menos humo y ello representa un menor bloqueo de la radiación que se puede desprender desde el incendio. Como se explicará detalladamente en el capítulo 5, el viento actúa disminuyendo la eficacia de combustión y la longitud de la llama y, por lo tanto, limita el efecto de aumento de radiación durante el *boilover*. Consecuentemente, una ecuación para la estimación de la intensidad de radiación debe tener en cuenta dicha velocidad del viento, en este sentido la ecuación (4.20) parece ser la más adecuada:

$$I_{b,rad} = a(h_b)^b (u)^c \quad (4.20)$$

Utilizando el criterio de la minimización de la suma de los errores al cuadrado, se ha determinado la correlación que mejor se ajusta a los datos experimentales:

$$I_{b,rad} = 1,10(h_b)^{0,38} (u)^{-0,17} \quad (4.21)$$

La ecuación (4.21) correlaciona los datos experimentales con un coeficiente de 0,82. Cabe destacar que el 73% de los datos están dentro del $\pm 10\%$ respecto al valor experimental y que el 95% de dichos datos están dentro del $\pm 15\%$ con respecto al mencionado valor (figura 4.20).

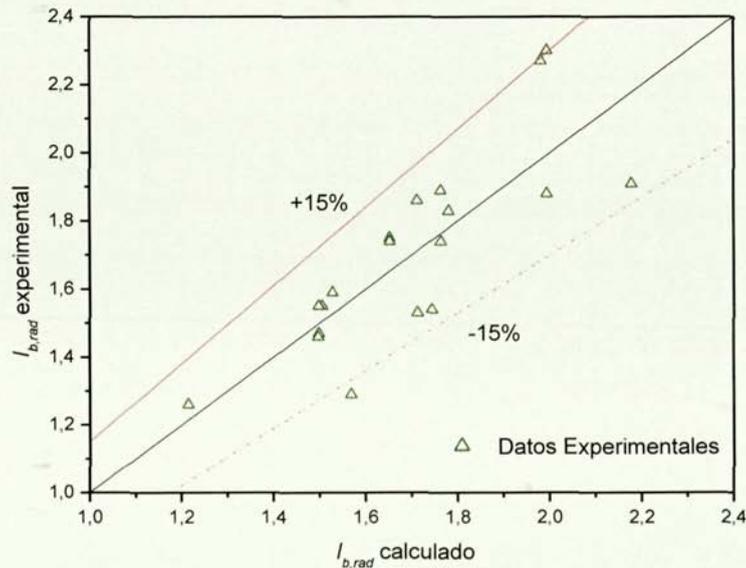


Figura 4.20. Representación gráfica del ajuste de la correlación (4.21).

Hay que remarcar que la ecuación (4.21) proporciona tan solo una estimación del incremento de la radiación desprendida al exterior del incendio, ya que para su

determinación se ha utilizado la velocidad del viento promedio entre el periodo estacionario y el *boilover*; por lo tanto, dicha ecuación solo es valida en caso en que las velocidades del viento entre los dos periodos no fueran muy diferentes.

En conclusión al presente capítulo, se quiere subrayar que, donde no haya sido especificado de forma diferente, las ecuaciones son utilizables para incendios con gasóleo en el campo experimental estudiado. Ahora bien, tal como muestran dichas correlaciones y las comparaciones realizadas con los escasos datos experimentales de otros autores, su aplicación puede ser extensible a otros combustibles y condiciones operativas.