

CAPÍTULO 3

ESTUDIO DE LA TEMPERATURA DE LLAMA EN INCENDIOS FORESTALES

3.1. INTRODUCCIÓN

Dada la importancia que tiene el mecanismo de transmisión de calor por radiación en los incendios forestales, así como la dependencia de dicho mecanismo respecto a la temperatura del cuerpo radiante, resulta evidente la importancia de la temperatura de las llamas en todo lo relacionado con el flujo calórico que tiene lugar en estos incendios.

Sin embargo, la temperatura de llama de los incendios forestales ha sido relativamente poco estudiada. La mayoría de autores que le han dedicado su atención han efectuado aproximaciones basadas en diversas simplificaciones, de las cuáles, la más usual e importante ha consistido en suponer una temperatura constante sobre toda la llama (equivalente a un valor medio aproximado).

La experiencia acumulada en el Centre d'Estudis del Risc Tecnològic indica, no obstante, que en el caso de llamas de gran tamaño – y, en consecuencia, muy turbulentas – esta suposición es en realidad falsa. Mediciones efectuadas según técnicas diversas – termopares, filmación con cámara termográfica - muestran claramente la existencia de un perfil de temperaturas con valores que, en el caso de balsas de combustible, aumentan desde la base de la llama para alcanzar un máximo a una cierta altura – a una cota variable, función de las características del incendio – y disminuir a continuación alcanzando los valores más bajos en el extremo superior de la llama. Esta experiencia ha sido comprobada por el autor en su participación en algunas de las pruebas experimentales desarrolladas en el año 2001 en la instalación experimental de Can Padró.

Es por esto que se ha considerado de interés introducir en esta tesis doctoral un capítulo destinado a estudiar cuál es realmente la distribución de temperaturas en un incendio forestal. Pese a no ser el objetivo fundamental de la tesis, esto ha permitido incorporar un elemento experimental que ciertamente contribuye a enriquecer el trabajo llevado a cabo, poniendo de manifiesto cuál es la situación real en lo que respecta a la temperatura de la llama y, en consecuencia, cuáles son las limitaciones que dicha situación impone a las diversas simplificaciones citadas. El establecimiento de la distribución de temperaturas sobre la llama de un incendio forestal y, de forma más concreta, la determinación de la falta de isothermicidad, permitirá conocer el orden de magnitud del error cometido al aceptar las simplificaciones antes mencionadas.

La obtención de los datos experimentales de partida ha sido posible por haber tenido la oportunidad de participar en una “quema prescrita” llevada a cabo por los bomberos de la Generalitat de Catalunya. También ha sido posible disponer de algunos datos experimentales obtenidos en la instalación experimental a escala reducida existente en el CERTEC (Pastor, 2004). Esto ha permitido efectuar una comparación de tipo cualitativo entre las llamas de un incendio a escala real y las correspondientes a un incendio a escala reducida.

3.2. TEMPERATURA DE LLAMA

El valor de la temperatura de una llama puede obtenerse teóricamente analizando cada proceso de combustión de forma específica.

Considerando el sistema de combustión, así como la correspondiente mezcla de gases inflamables y aire, y suponiendo condiciones adiabáticas (es decir, suponiendo que no hay

transferencia de calor desde o hacia el sistema), es posible mediante un balance de calor, calcular la temperatura que alcanzará el conjunto de gases en combustión (la llama). Dada la suposición efectuada, la temperatura obtenida será la denominada “temperatura adiabática de llama”. Lógicamente, su valor será considerablemente más elevado que la temperatura correspondiente a un incendio real, ya que en éste las condiciones no serán adiabáticas: hay pérdidas de calor y, además, a temperaturas elevadas los productos de reacción se disocian y absorben una parte de la energía. En todo caso, el cálculo de la temperatura adiabática permite obtener una estimación a la alta de la temperatura de las llamas, constituyendo en realidad su límite superior (Casal *et al.*, 1999).

Sin embargo, una estimación de este tipo está alejada de la realidad, por lo que la medición experimental de la temperatura de llama ha de dar con toda seguridad datos mucho más interesantes. Por otra parte, dicha medición puede permitir – y éste ha sido también uno de los objetivos de este capítulo – la determinación del grado de isotermita (o de ausencia de isotermita, más lógica) de la llama. Al plantearse el posible perfil de la temperatura en las llamas en un incendio forestal cabe esperar un comportamiento distinto al de los fuegos de balsas de hidrocarburo previamente descritos, dada la distinta distribución del combustible (en las balsas de hidrocarburo el líquido que genera el vapor combustible se encuentra en la base de la llama, mientras que en los incendios forestales el combustible tiene una distribución en sentido vertical). Asimismo, hay que tener en cuenta que la dinámica es distinta en los dos casos citados: en el caso de balsas de combustible se trata de un proceso en estado estacionario (una vez el incendio totalmente desarrollado), mientras que en el caso de un incendio forestal, si bien puede considerarse hasta cierto punto estacionario, no hay que olvidar que el frente de llama está avanzando continuamente, iniciándose por tanto un “nuevo” incendio cada vez que la llama se propaga hasta el siguiente combustible sin quemar. De esta forma, puede considerarse que el frente de llama está continuamente iniciándose y desarrollándose, si bien en términos estadísticos puede considerárselo estacionario.

3.3. CARACTERÍSTICAS DE LAS QUEMAS O ENSAYOS LLEVADOS A CABO

Como ya ha sido indicado anteriormente, los datos experimentales se obtuvieron a partir de:

- a) Quema prescrita efectuada por el grupo de apoyo a las actuaciones forestales (GRAF) de los bomberos de la Generalitat de Cataluña, el 18 de Marzo de 2002 en el parque natural del delta del Ebro perteneciente al municipio de Amposta, Cataluña.

Las imágenes fueron tomadas de una parcela (cañaveral) de 13 hectáreas de superficie con un perímetro de 3230 m. La velocidad del viento osciló entre 14 y 16 km/h, pudiendo considerarse prácticamente constante.

- b) Ensayos de laboratorio en una mesa de combustión localizada en el laboratorio del departamento de Ingeniería Química. El combustible forestal quemado fue heno. Los detalles de la instalación y experimentos realizados pueden consultarse en los trabajos de Pastor (2004) y Pérez (2003).

3.4. OBTENCIÓN DE PERFILES DE TEMPERATURA MEDIANTE EL USO DE LA CÁMARA TERMOGRÁFICA

La termografía infrarroja es una técnica que permite la captación de imágenes térmicas (mediciones de temperatura sobre toda la superficie captada) en tiempo real. Sin embargo, en los sistemas de termografía infrarroja la temperatura no es medida directamente, sino que el equipo (cámara infrarroja) capta la radiación incidente sobre el detector y es necesario conocer los factores que afectan su medida. Los principales factores son: la emisividad, la temperatura ambiente, la distancia, la humedad relativa y la temperatura atmosférica. De entre éstos, la emisividad de la llama es el parámetro más difícil de obtener o estimar de forma fiable. Y es por esto que actualmente en el campo de los incendios forestales, dicha técnica es empleada solamente para la detección de incendios (puntos calientes). Existe por tanto toda una gama de posibilidades para la investigación en este campo.

3.4.1. Sistema experimental del Centre d'Estudis del Risc Tecnològic

En el Centre d'Estudis del Risc Tecnològic, Pastor (2004) ha diseñado y puesto en marcha un sistema para el estudio de los incendios forestales a pequeña escala (laboratorio). Dicho sistema experimental está básicamente constituido por una mesa de combustión donde se realizan los experimentos. La mesa ha sido equipada con diversos equipos para la adquisición de datos: una cámara termográfica, una cámara de vídeo, una balanza y un sistema de termopares que registra las variaciones de temperatura en función del tiempo y de la posición. Las temperaturas medidas con los termopares son captadas por un sistema LabVIEW, constituido por un panel de interfase con el usuario y un diagrama de bloques. Este software utiliza un sistema Field Point de adquisición de datos. La descripción detallada de la instalación incluyendo el sistema de adquisición de datos puede encontrarse en el trabajo de tesis de Pastor (2004). Cabe señalar que las imágenes termográficas a nivel de laboratorio utilizadas en este trabajo, han sido adquiridas de uno de los ensayos realizados durante la puesta a punto del sistema antes mencionado.

Para el desarrollo de este capítulo, el sistema más importante es el de adquisición y tratamiento de imágenes termográficas. Fundamentalmente, está constituido por la cámara termográfica y el software *ThermaCAM researcher 2001*. A continuación, se presentan las principales características de ambos elementos.

Cámara termográfica

La cámara termográfica empleada es un modelo AGEMA 570, fabricada por FLIR System AB. Aunque no es posible la filmación continua de la progresión de un incendio, sí permite la obtención de 5 imágenes por segundo. El almacenamiento de dichas imágenes se efectúa en una tarjeta PCMCIA del tipo III de 170 Mb, con una capacidad máxima de 1000 imágenes. Cada una de ellas puede ser analizada con el programa *ThermaCAM researcher*, proporcionado por la misma casa distribuidora. En la tabla 3.1 se proporciona un resumen de las principales especificaciones técnicas de la cámara.

Tabla 3.1 Especificaciones técnicas de la cámara termográfica modelo AGEMA 570

<i>Parámetro</i>	<i>Especificación</i>
Rango de medición de temperatura	-20 °C a 1500 °C
Precisión de la medición	± 2 %
Sensibilidad térmica	< 0,15 °C
Campo de visión (H x V)	24 ° x 18 °
Distancia mínima de enfoque	0,5 m
Tipo de detector	Focal Plane Array (FPA) Microbolometer 320 x 240 pixels
Región espectral comprendida	7,5 a 13 μm
Peso y dimensiones	2,3 kg (incluyendo batería) 220x133x140 mm

Una descripción más detallada de la cámara termográfica y de su uso durante la experimentación puede consultarse en la tesis de Chatris (2001) (en la que la cámara fue utilizada para el estudio de incendios de balsas de hidrocarburos) y en Pérez (2003).

Programa ThermaCAM researcher 2001

ThermaCAM researcher 2001 es un programa desarrollado por FLIR Systems AB, con el propósito de servir como interfase entre la cámara termográfica y el PC durante la adquisición de imágenes termográficas. También ha sido diseñado para servir como una herramienta en la manipulación y tratamiento de dichas imágenes termográficas.

Para el estudio de la temperatura de la llama efectuada en este capítulo, se utilizan los siguientes elementos del programa citado:

- *Imágenes termográficas.* Con la correspondiente distribución superficial de temperaturas, representadas mediante colores o niveles de gris.
- *Ventanas de resultados.* Existen cuatro ventanas que se pueden visualizar activando la pestaña correspondiente (análisis, posición, parámetros del objetivo e imagen).

Ventana de análisis: muestra, de la imagen termográfica en estudio, los valores de temperatura máxima, mínima y diferencia entre ambas. Además de dichos valores, para las líneas rectas, cursor o de una zona seleccionada, se muestra un promedio y la desviación estándar.

Ventana de posición: muestra mediante un sistema de coordenadas la posición del cursor, de la línea recta o de una zona seleccionada. Considera como punto de referencia (0,0) el vértice superior izquierdo de la imagen termográfica desplegada.

Ventana de los parámetros del objetivo: muestra los parámetros asignados por el usuario (emisividad, temperatura ambiente, temperatura atmosférica, distancia,

humedad relativa del aire, transmisividad atmosférica) y que han sido utilizados por el software interno de la cámara para la determinación de la temperatura.

Ventana de imagen: muestra datos de la imagen (nombre del archivo donde se ha guardado la imagen, además de la fecha y la hora de la adquisición de la imagen).

- *Línea de análisis.* Son líneas rectas que se pueden dibujar a lo largo de la zona de interés. El programa proporciona los valores de temperatura mínima, máxima, promedio y desviación estándar que se presenten a lo largo de tales líneas de referencia. Se les puede asignar un cursor y desplazarlo a lo largo de cada línea, conociendo el valor de la temperatura en cada punto de la misma. Se identifican como LI01, LI02, LI03,..., LI99.
- *Histograma.* Muestra la distribución de temperaturas en un área establecida o bien sobre la línea recta que corresponda (LI01, LI02, LI03,..., LI99). Muestra el porcentaje de valores para cada clase, los límites de temperatura por clase y la gráfica de barras.
- *Gráfica de perfil de temperaturas.* Ilustra las variaciones de temperatura a través de la(s) línea(s) recta(s) colocada(s) en la imagen termográfica, mostrando en la parte baja de la gráfica los valores numéricos de temperatura mínima, máxima y promedio de la(s) línea(s) recta(s) consideradas. Puede incluirse la temperatura máxima y mínima de un cursor. Además, se muestra la posición (sistema de coordenadas x, y) de los elementos considerados.

3.5. IMÁGENES TERMOGRÁFICAS, HISTOGRAMAS Y GRÁFICAS

En esta sección se presentan los datos experimentales obtenidos. Debe señalarse que los datos registrados en los ensayos de laboratorio y quemas prescritas tienen limitaciones importantes. Los primeros han sido tomados en fases previas del desarrollo y puesta en marcha de las instalaciones y equipo del laboratorio (aun sin considerar métodos de adquisición de parámetros geométricos importantes en la modelización de la llama, que, por otra parte, cabe señalar son del orden de centímetros; es decir, las llamas no superan en ningún caso 1 m de longitud). En lo que respecta a las quemas prescritas, éstas han sido realizadas sin la posibilidad de obtención de puntos de referencia que permitan conocer las dimensiones que caracterizan a las llamas (las dimensiones son del orden de metros). Consecuentemente, no es aconsejable utilizar los datos de forma cuantitativa para la modelización de la transferencia del calor.

No obstante, cualitativamente o en cuanto al comportamiento y tendencias, estos datos son claramente de utilidad, permitiendo la obtención de perfiles de temperatura representativos. Así pues, utilizando los valores mostrados por el programa ThermaCAM se han obtenido una serie de representaciones gráficas, realizadas en Excel, de valores relativos de temperatura (T/T_{max}) en función de la longitud de llama (l/L_{max}).

A continuación se presentan, para cada caso, la imagen termográfica con las líneas rectas seleccionadas, los datos numéricos, los histogramas, y los perfiles de temperatura correspondientes.

Las imágenes termográficas utilizadas se han seleccionado entre el conjunto de imágenes disponibles por haberse las considerado, de forma cualitativa, representativas de las pautas observadas (para la quema prescrita y para los datos de laboratorio, respectivamente) en dicho conjunto.

Las líneas sobre las cuales se han determinado los perfiles de temperatura, se han trazado en dichas imágenes intentando cubrir las zonas más significativas del frente de llama (por su forma, dimensiones y por los valores máximos de temperatura).

3.5.1. Quema prescrita en el Delta del Ebro

Imagen 1

Fecha	18/02/2002
Hora	13:46:58
Nombre de archivo	C0218-41.img

Análisis

Nivel	Valor [K]	T mín, K	T máx , K	Tmáx – mín, K	Prom, K	Stdev
Imagen		<487	1335	*847		
LI01	1272,3	802	1272	469	1120	90,6
LI02	1283,7	701	1283	582	1079	188,7
LI03	1284,4	793	1284	490	1107	121,0

Posición

Nivel	Pos X1	Pos Y1	Pos X2	Pos Y2
LI01	100	62	147	152
LI02	211	53	212	143
LI03	251	55	277	137

Parámetros del objetivo

Nivel	Emis.	Distancia	T amb, K	T atm, K	Trans. atm.	Hum.
Imagen	0,95	50 m	293	293	0,96	50%



Figura 3.5.1 Imagen termográfica C0218-41

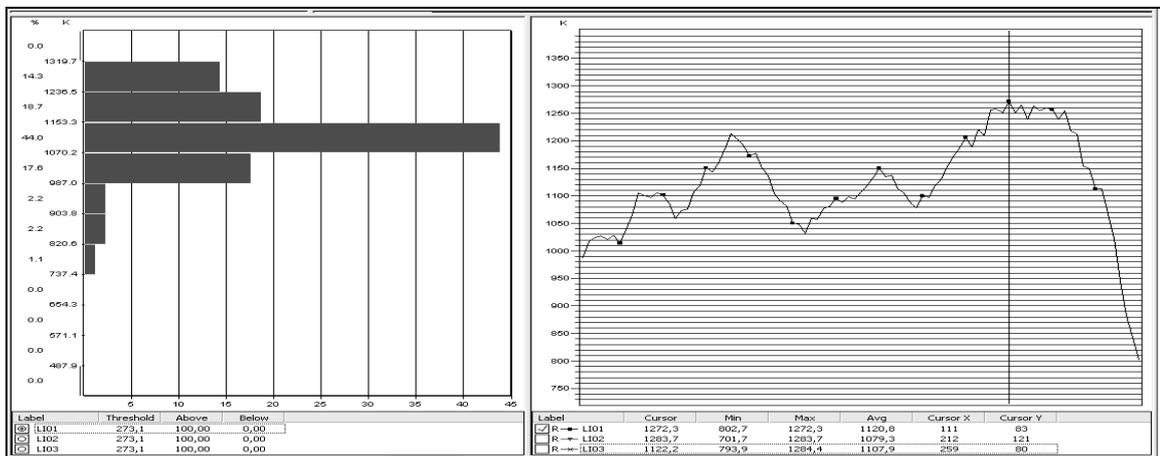


Figura 3.5.2. Histograma y distribución de temperatura en la línea LI01.

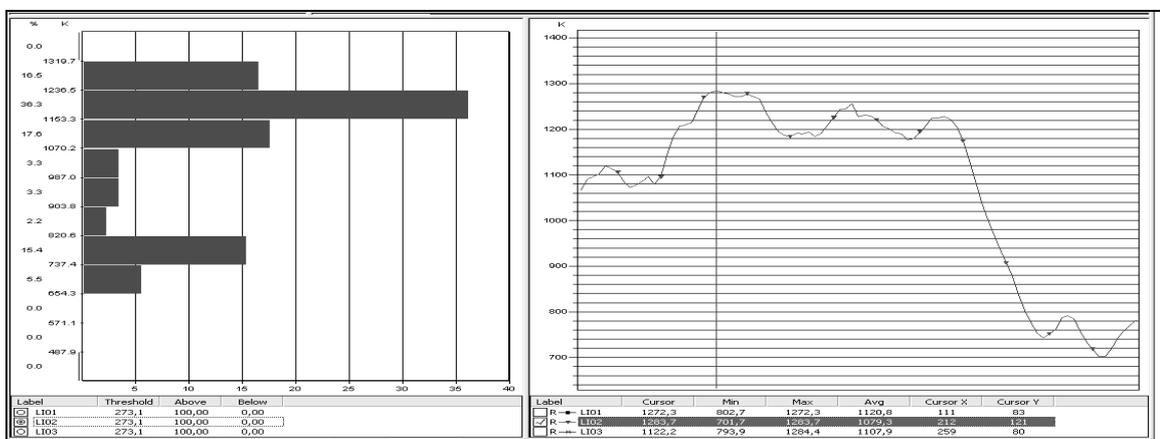


Figura 3.5.3. Histograma y distribución de temperatura en la línea LI02

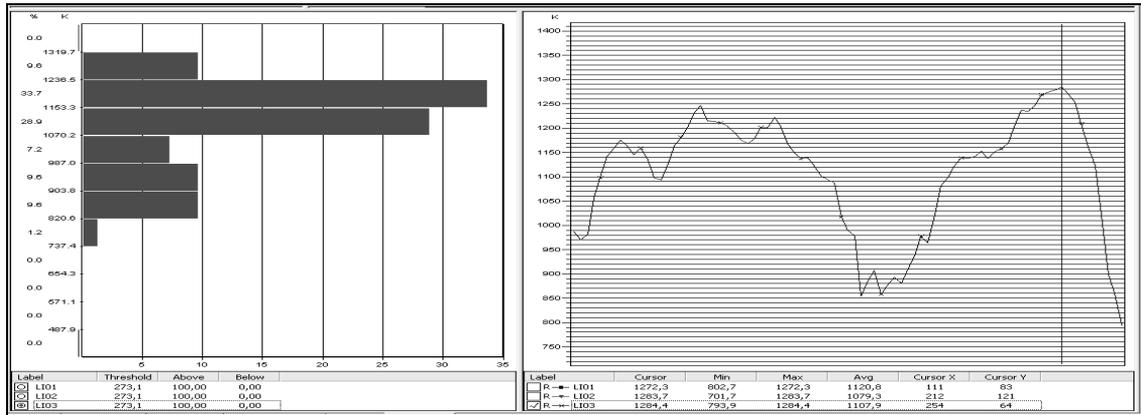


Figura 3.5.4. Histograma y distribución de temperatura en la línea LI03.

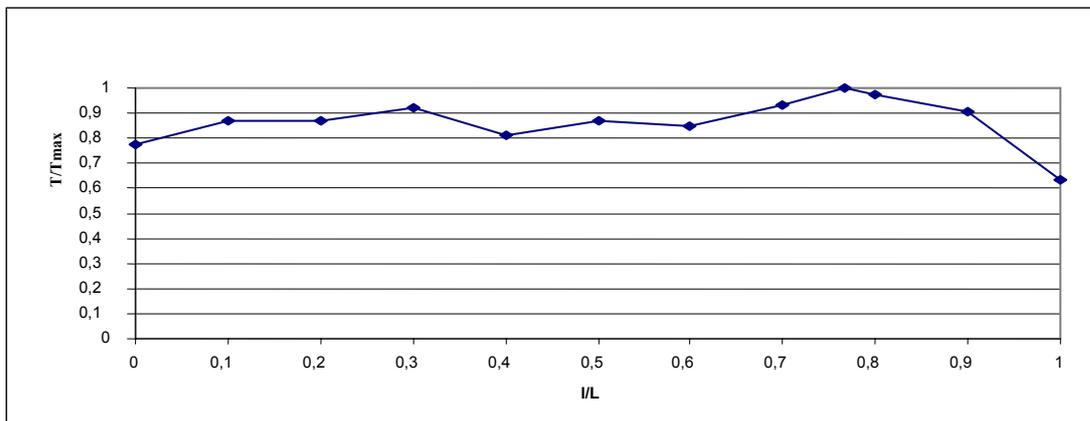


Figura 3.5.5. Perfil de temperatura de LI01.

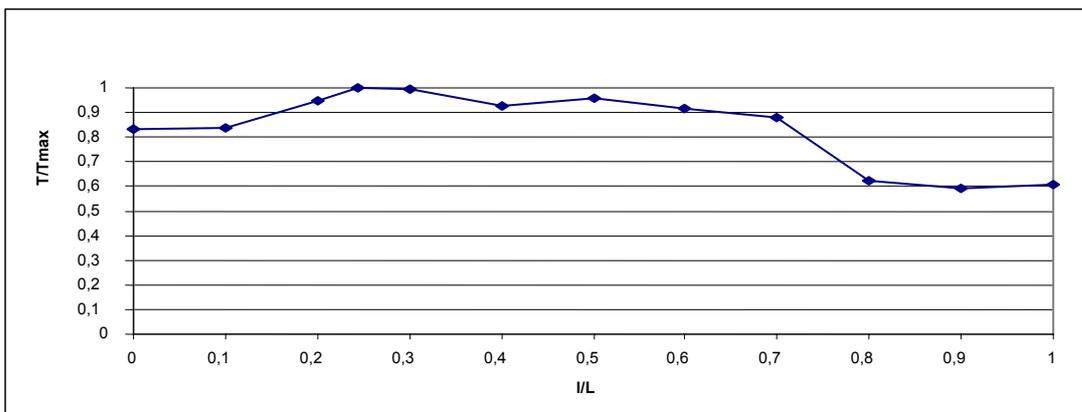


Figura 3.5.6. Perfil de temperatura de LI02.

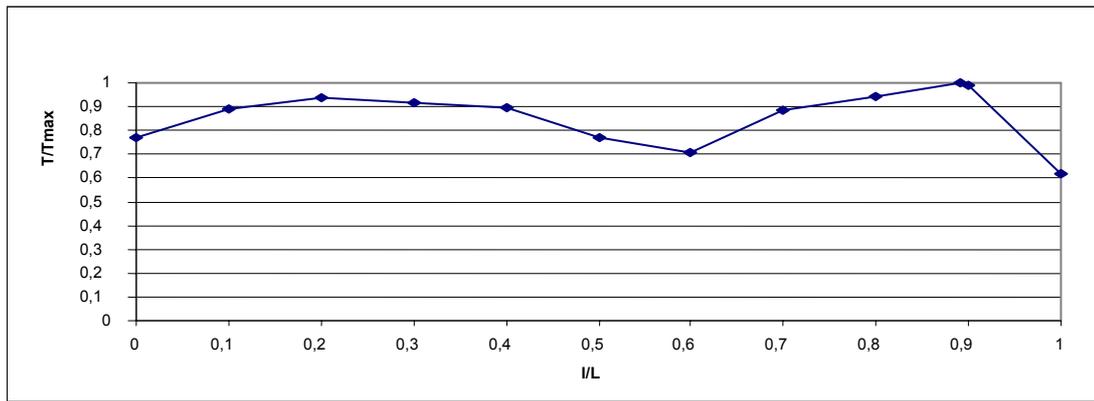


Figura 3.5.7. Perfil de temperatura de LI03.

Imagen 2

Fecha 18/02/2002
 Hora 13:47:26
 Nombre de archivo C0218-51.img

Análisis

Nivel	Valor [K]	T mín, K	T máx , K	Tmáx – mín, K	Prom, K	Stdev
Imagen		<487	1391	*903		
LI01	1391,0	*552	1391	838	*982	208,1
LI02	1313,3	703	1313	610	1029	192,1

Posición

Nivel	Pos X1	Pos Y1	Pos X2	Pos Y2
LI01	66	141	74	50
LI02	279	126	297	45

Parámetros del objetivo

Nivel	Emis.	Distancia	T amb, K	T atm, K	Trans. atm.	Hum.
Imagen	0,92	50 m	293	293	0,96	50%

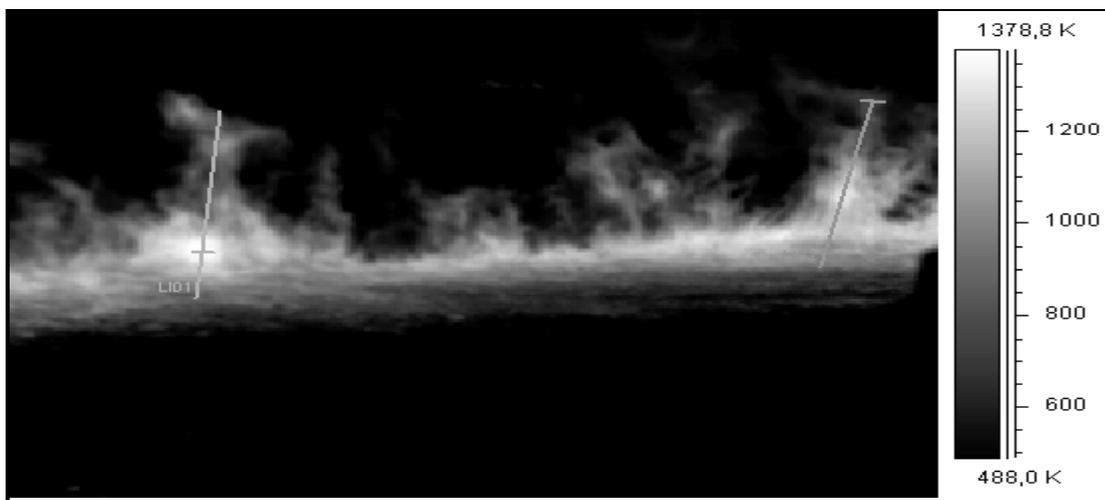


Figura 3.5.8. Imagen termográfica C0218-51.

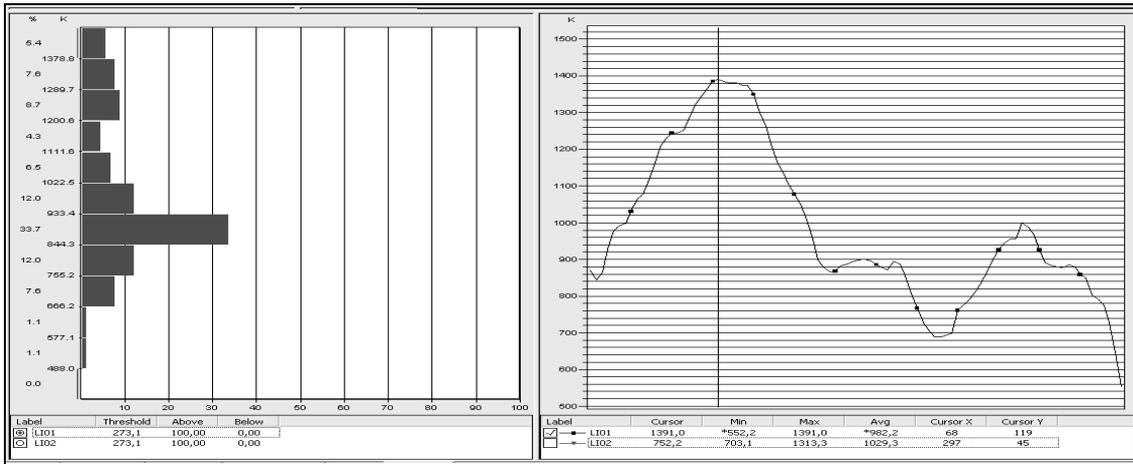


Figura 3.5.9. Histograma y distribución de temperatura en la línea LI01.

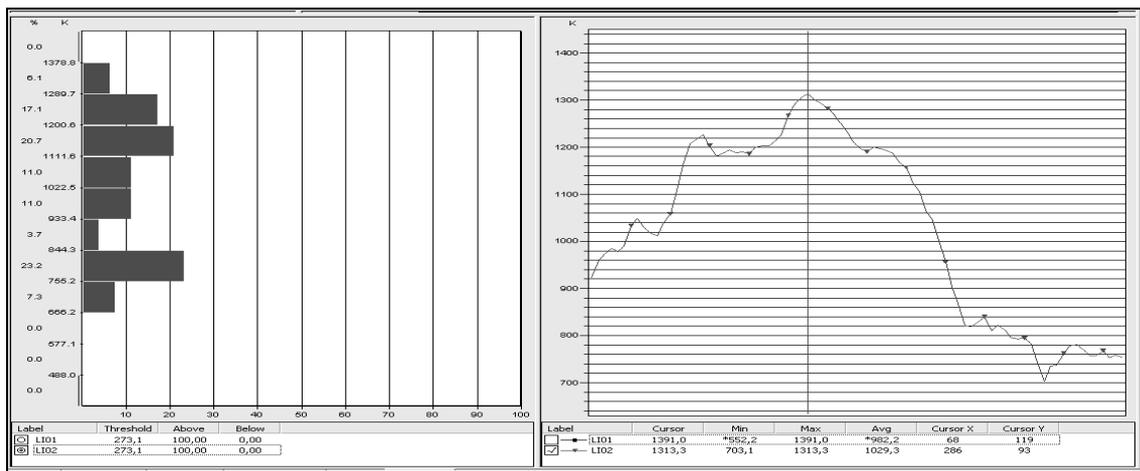


Figura 3.5.10. Histograma y distribución de temperatura en la línea LI02.

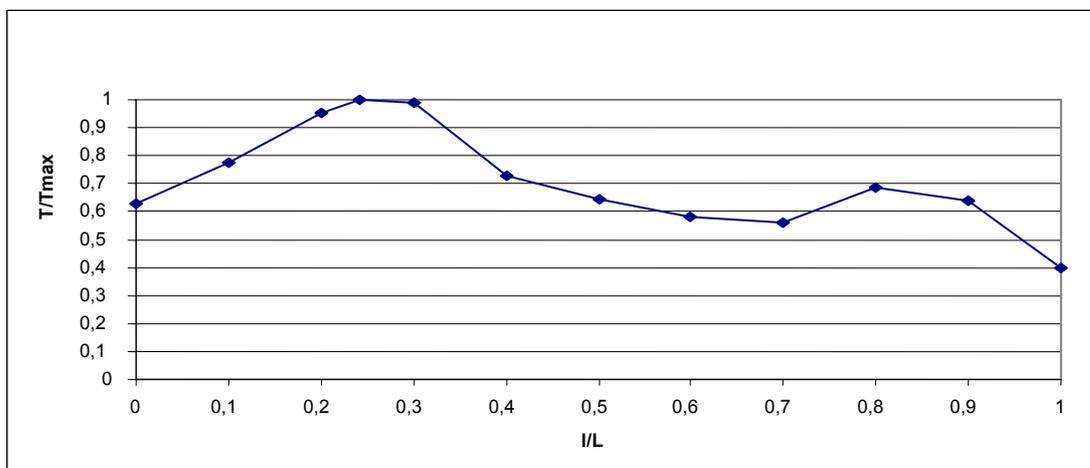


Figura 3.5.11. Perfil de temperatura de LI01.

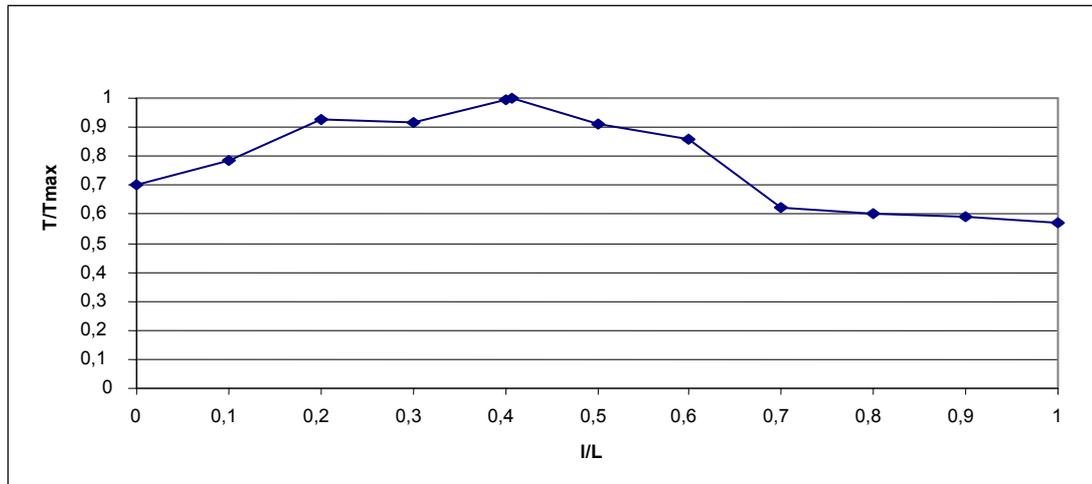


Figura 3.5.12. Perfil de temperatura de LI02

Imagen 3

Fecha 18/02/2002
 Hora 13:49:14
 Nombre de archivo C0218-66.img

Análisis

Nivel	Valor [K]	T mín, K	T máx , K	Tmáx – mín, K	Prom, K	Stdev
Imagen<		487	1328	*840		
LI01	1216	*567	1216	649	*984,9	111,1
LI02	1041	*575	1320	744	*961,8	199,6
LI03	1216	813	1216	402	1098,5	103,0

Posición

Nivel	Pos X1	Pos Y1	Pos X2	Pos Y2
LI01	105	28	149	90
LI02	175	28	220	89
LI03	239	53	266	88

Parámetros del objetivo

Nivel	Emis.	Distancia	T amb, K	T atm, K	Trans. atm.	Hum.
Imagen	0,92	50 m	298	298	0,99	50%

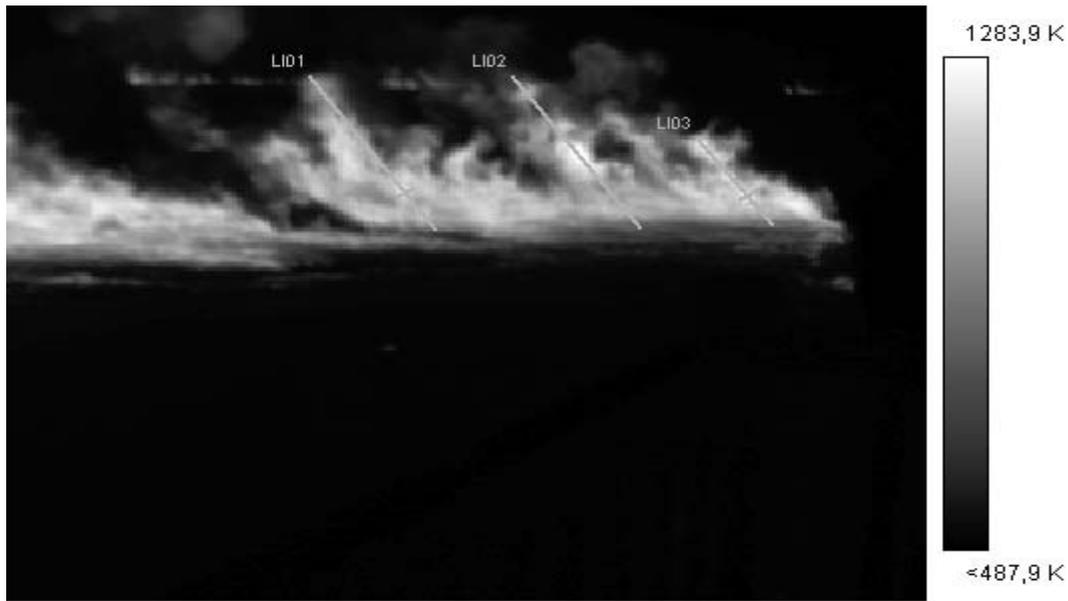


Figura 3.5.13. Imagen termográfica C0218-66.

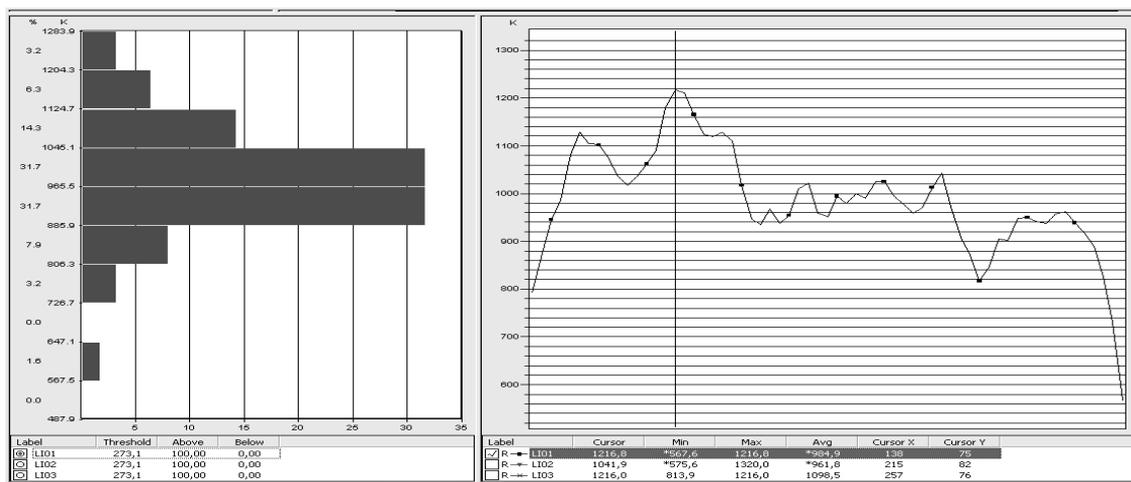


Figura 3.5.14. Histograma y distribución de temperatura en la línea LI01.

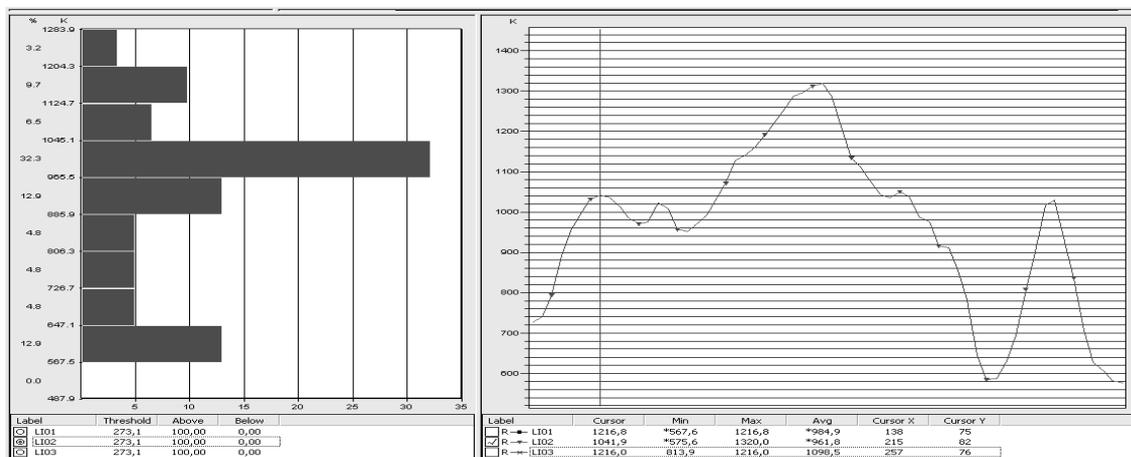


Figura 3.5.15. Histograma y distribución de temperatura en la línea LI02.

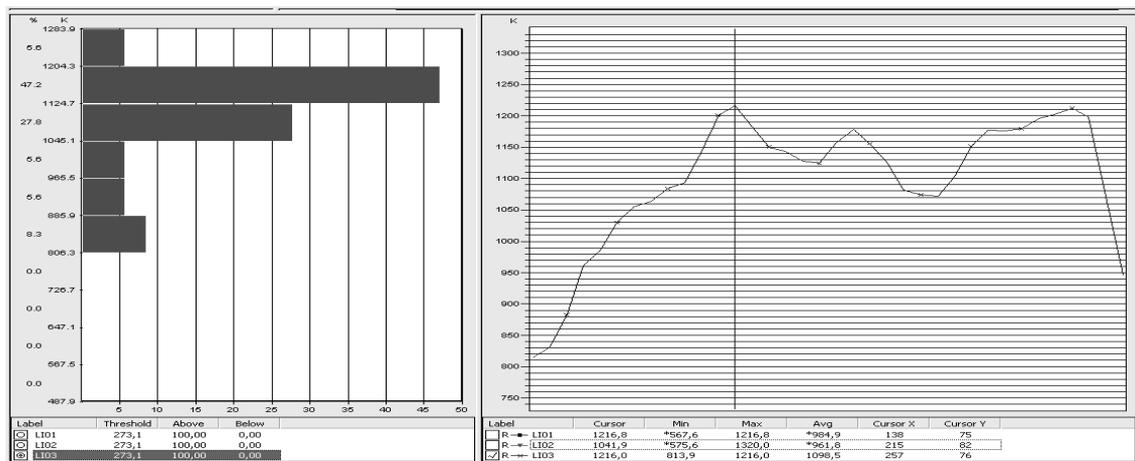


Figura 3.5.16. Histograma y distribución de temperatura en la línea LI03.

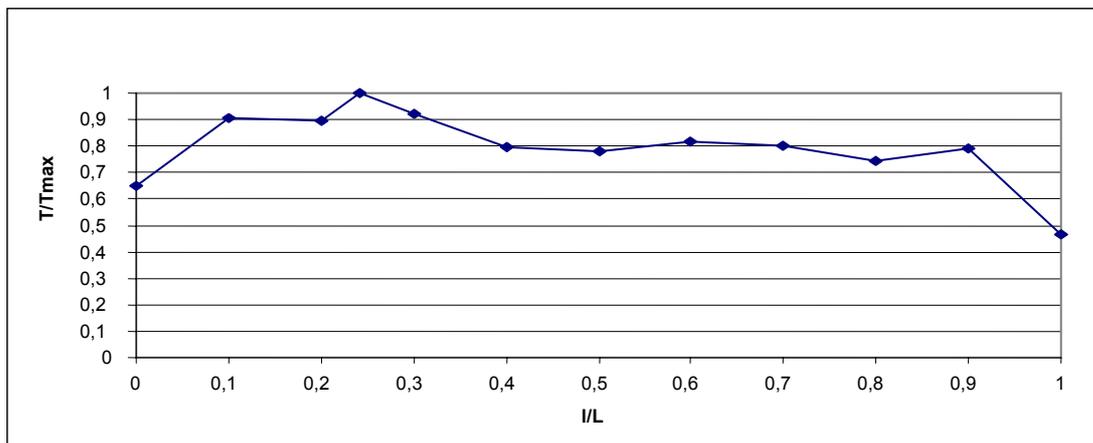


Figura 3.5.17. Perfil de temperatura de LI01.

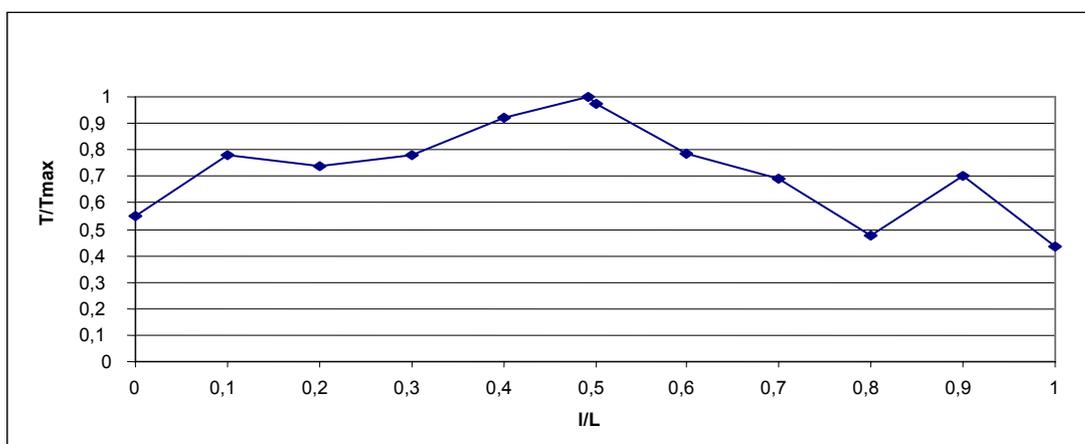


Figura 3.5.18. Perfil de temperatura de LI02.

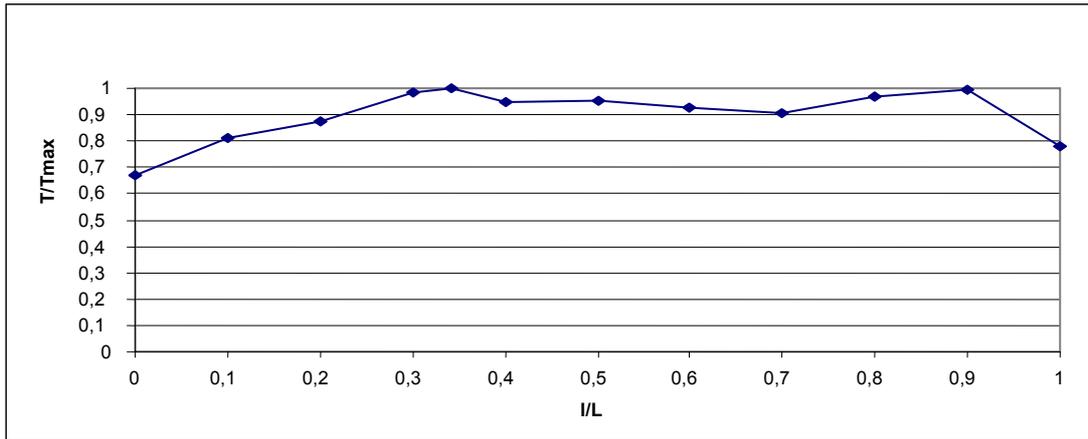


Figura 3.5.19. Perfil de temperatura de LI03.

3.5.2. Ensayos de laboratorio en la mesa de combustión

Imagen 4

Fecha 08/11/2002
 Hora 18:41:30
 Nombre de archivo 0066.seq-52

Análisis

Nivel	Valor [K]	T mín, K	T máx , K	Tmáx – mín, K	Prom, K	Stdev
Imagen		<303	569	*266		
LI01	379,2	*344	487	142	*407	31
LI02	531,8	*310	531	221	*419	54

Posición

Nivel	Pos X1	Pos Y1	Pos X2	Pos Y2
LI01	47	150	73	77
LI02	143	72	146	156

Parámetros del objetivo

Nivel	Emis.	Distancia	T amb, K	T atm, K	Trans. atm.	Hum.
Imagen	0,92	2 m	298	298	0,99	50%

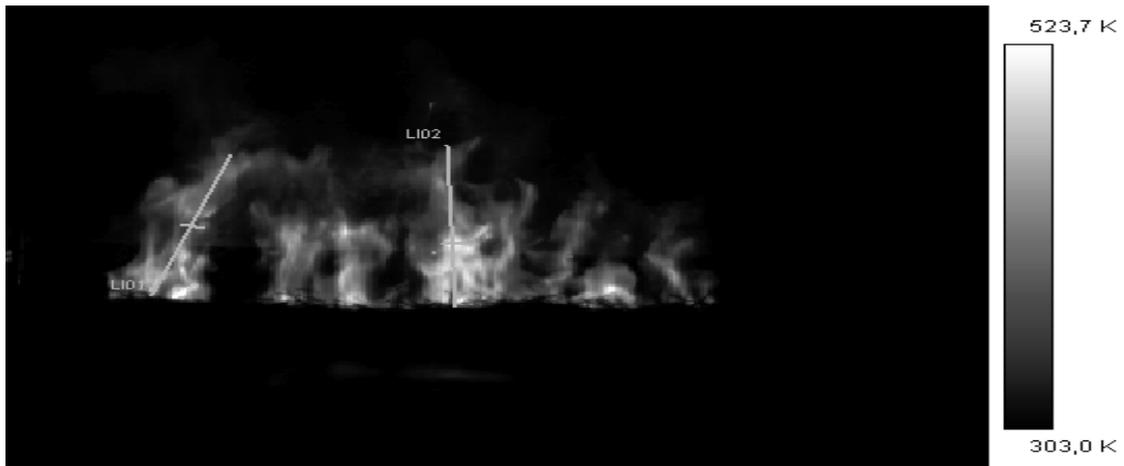


Figura 3.5.20. Imagen termográfica 0066.seq-52

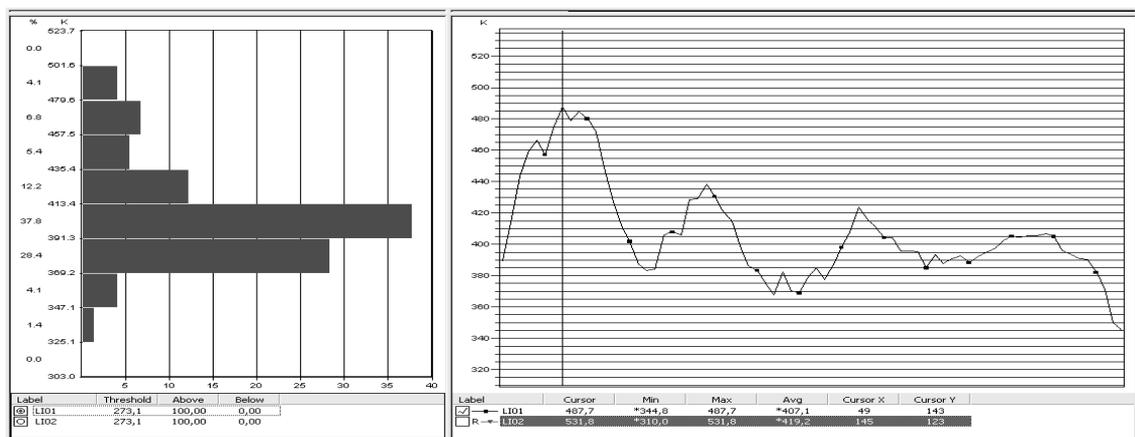


Figura 3.5.21. Histograma y distribución de temperatura en la línea LI01.

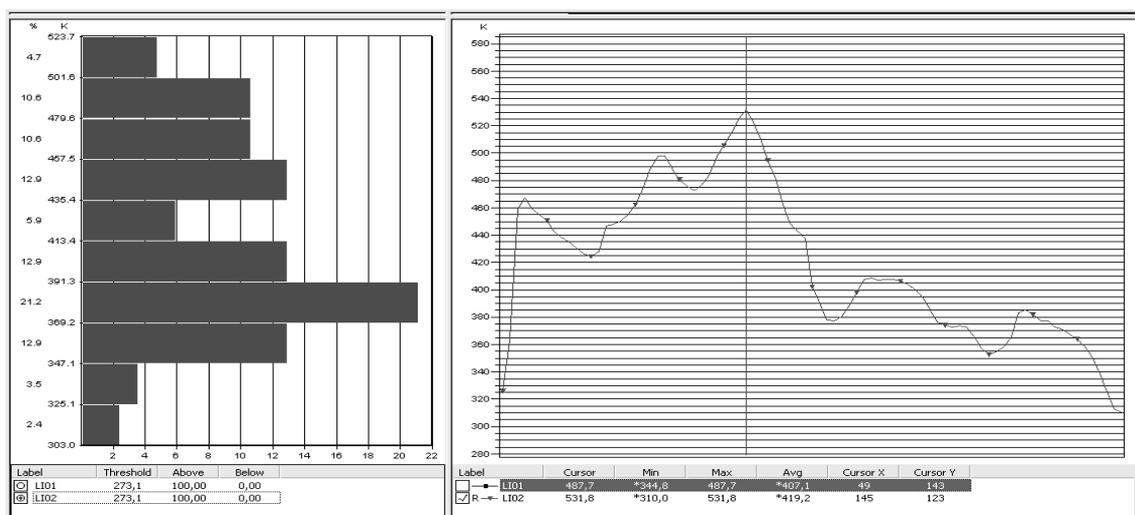


Figura 3.5.22. Histograma y distribución de temperatura en la línea LI02.

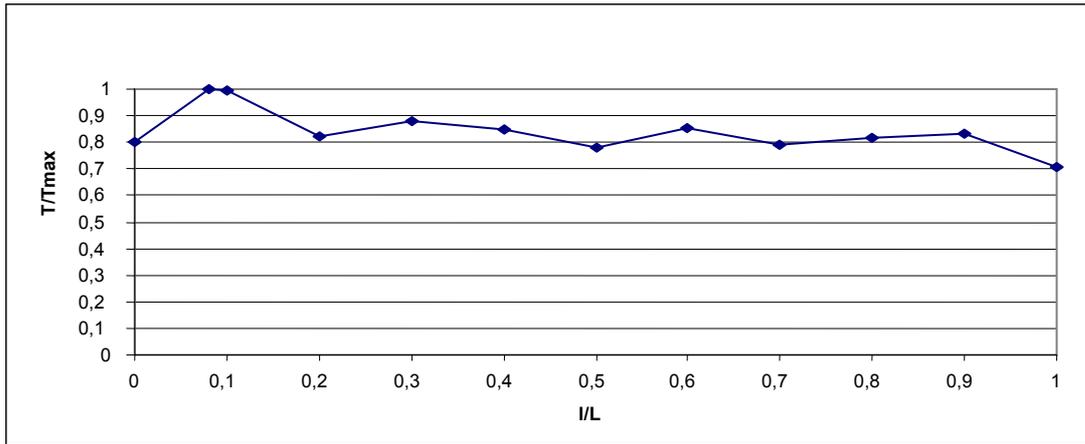


Figura 3.5.23. Perfil de temperatura de LI01.

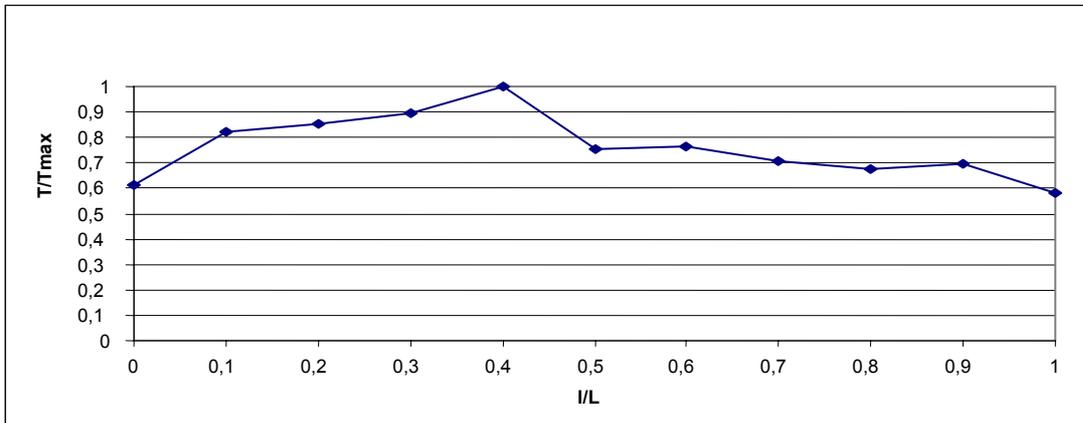


Figura 3.5.24. Perfil de temperatura de LI02.

Imagen 5

Fecha 08/11/2002
 Hora 18:41:48
 Nombre de archivo 0066.seq-121

Análisis

Nivel	Valor [K]	T mín, K	T máx , K	Tmáx – mín, K	Prom, K	Stdev
Imagen	<303		517		*214	
LI01	431	*349	500	151	*418	39,6
LI02	451	*348	496	147	*413	41,6

Posición

Nivel	Pos X1	Pos Y1	Pos X2	Pos Y2
LI01	13	85	36	153
LI02	158	83	158	153

Parámetros del objetivo

Nivel	Emis.	Distancia	T amb, K	T atm, K	Trans. atm.	Hum.
Imagen	0,92	2 m	298	298	0,99	50%



Figura 3.5.25. Imagen termográfica 0066.seq-121.

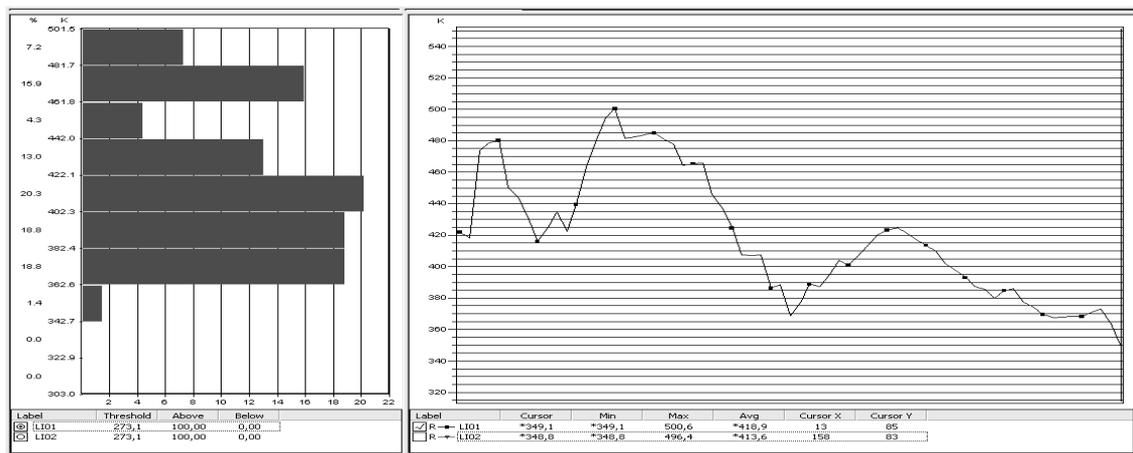


Figura 3.5.26. Histograma y distribución de temperatura en la línea LI01.

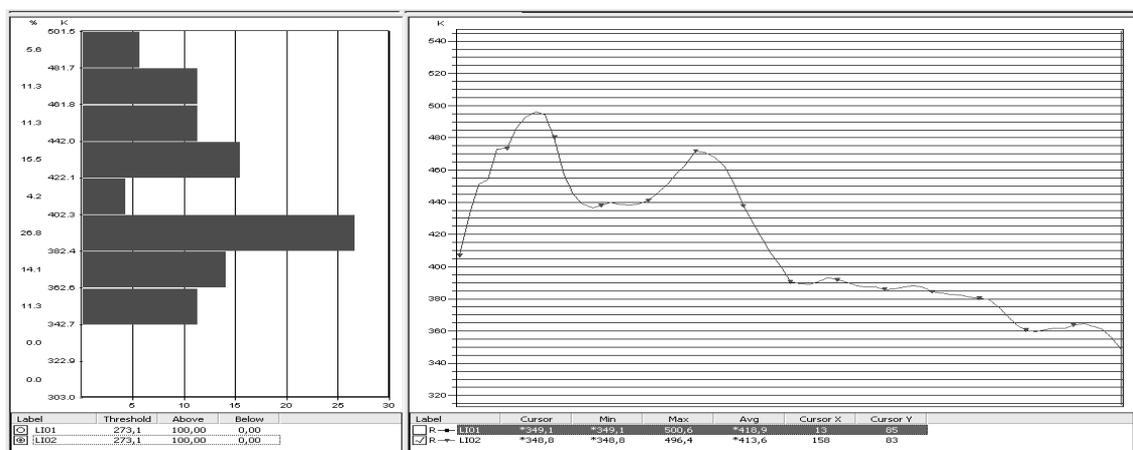


Figura 3.5.27. Histograma y distribución de temperatura en la línea LI02

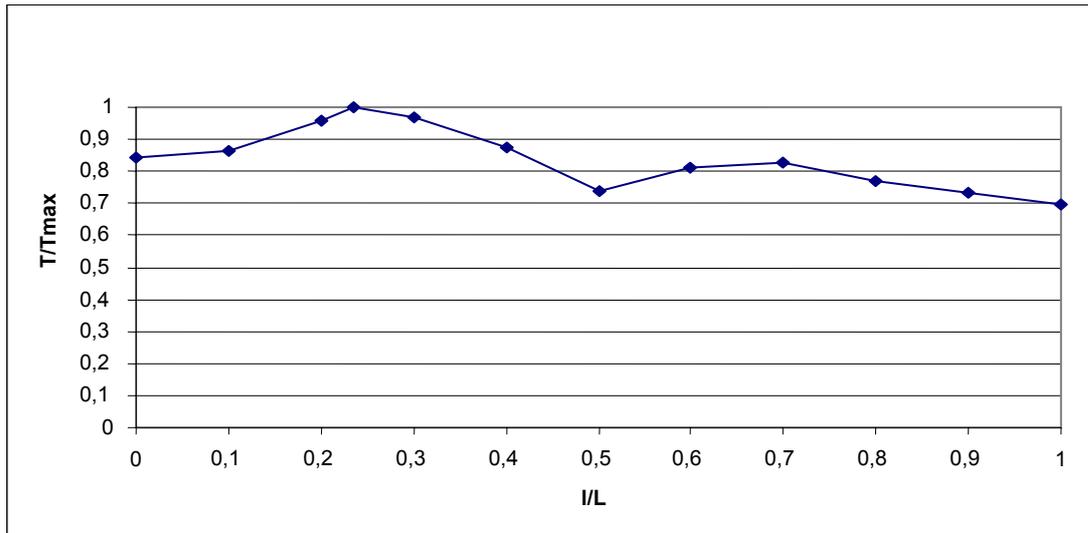


Figura 3.5.28. Perfil de temperatura de LI01.

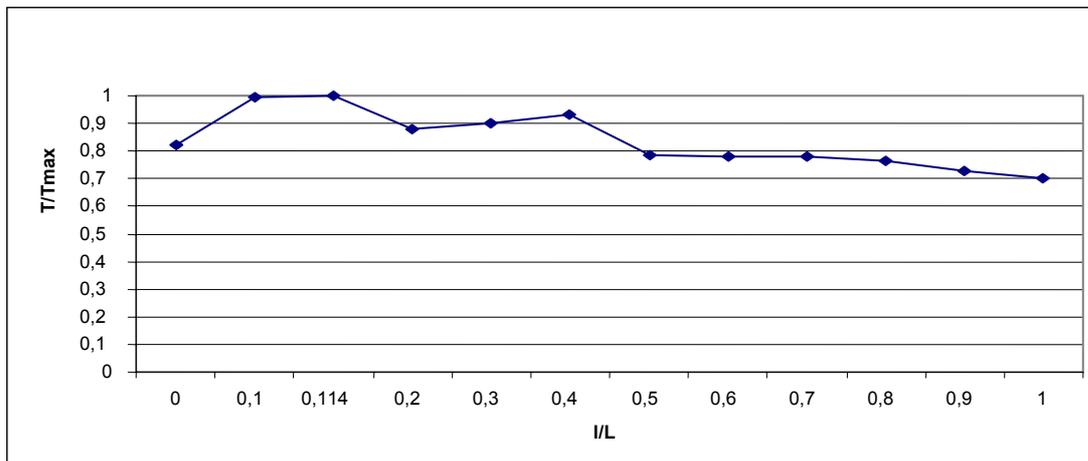


Figura 3.5.29. Perfil de temperatura de LI02.

Imagen 6

Fecha 08/11/2002

Hora 19:53:29

Nombre de archivo Foc_2_plnova.seq-214

Análisis

Nivel	Valor [K]	T mín, K	T máx , K	Tmáx – mín, K	Prom, K	Stdev
Imagen	<303		658	*355		
LI01	530	*331	587	256	*398	42,8
LI02	404	*347	479	132	*403	38,3
LI03	417	*349	503	154	*438	45,0

Posición

Nivel	Pos X1	Pos Y1	Pos X2	Pos Y2
LI01	64	99	85	159

LI02	116	94	123	156
LI03	172	108	179	158

Parámetros del objetivo

Nivel	Emis.	Distancia	T amb, K	T atm, K	Trans. atm.	Hum.
Imagen	0,92	2 m	298	298	0,99	50%



Figura 3.5.30. Imagen termográfica Foc_2_plnova.seq-214

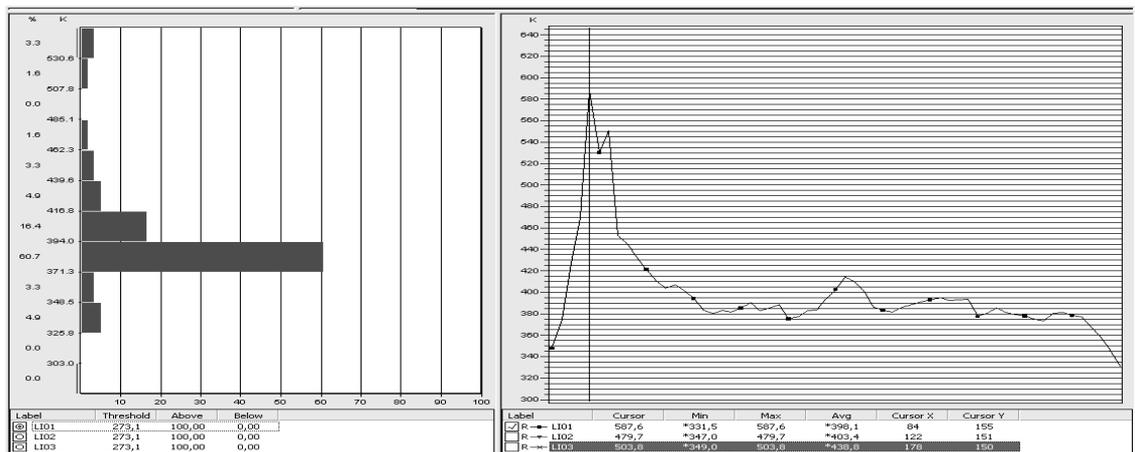


Figura 3.5.31. Histograma y distribución de temperatura en la línea LI01.

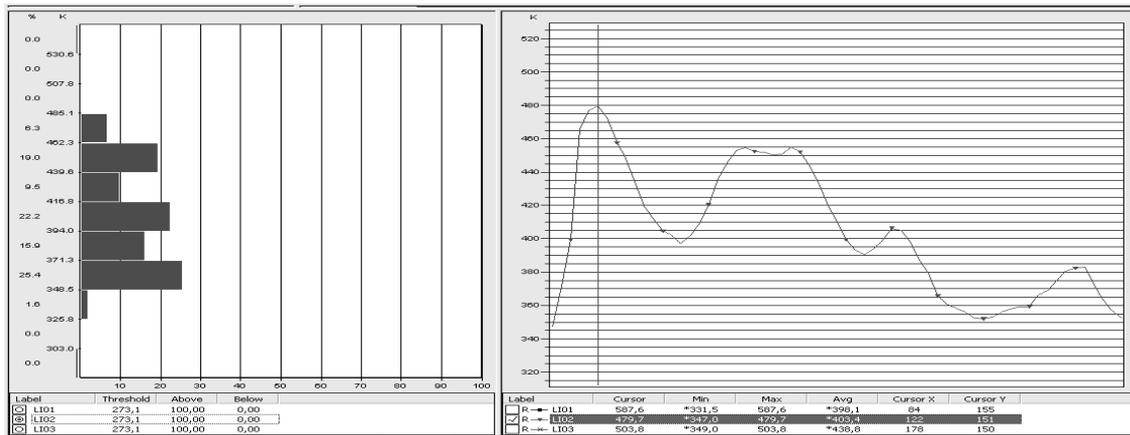


Figura 3.5.32. Histograma y distribución de temperatura en la línea LI02.

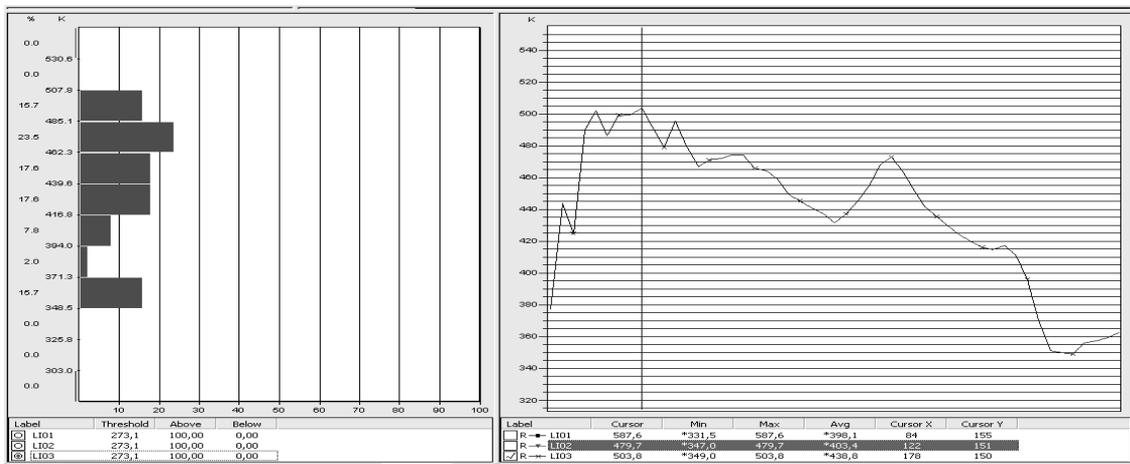


Figura 3.5.33. Histograma y distribución de temperatura en la línea LI03.

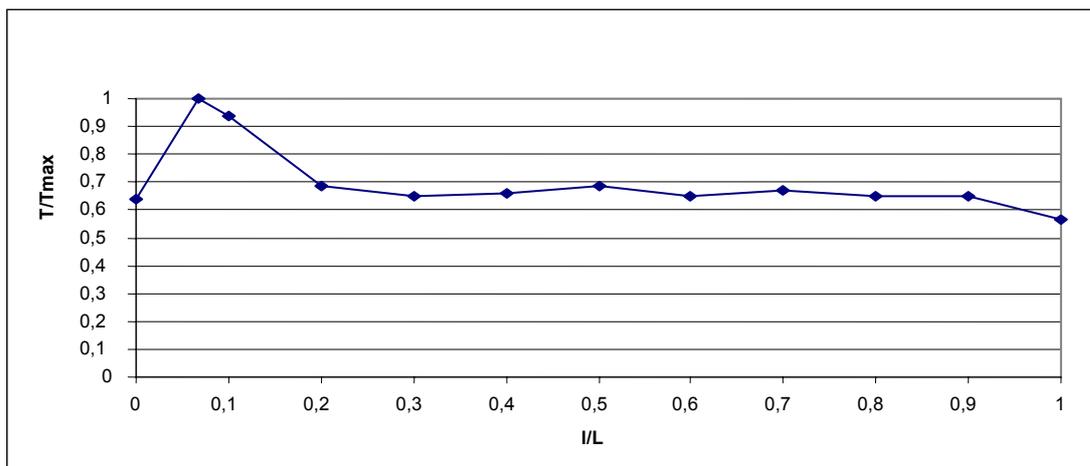


Figura 3.5.34. Perfil de temperatura de LI01

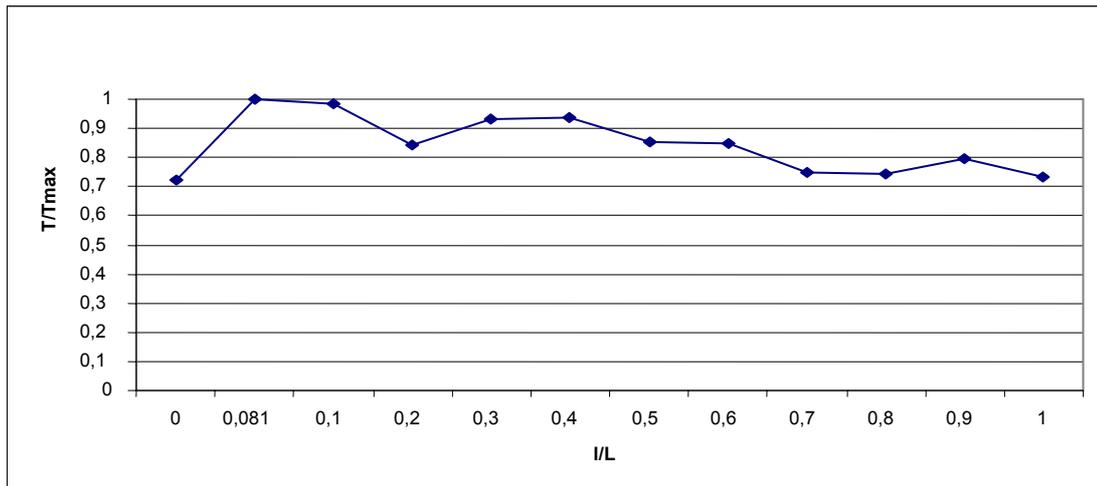


Figura 3.5.35. Perfil de temperatura de LI02.

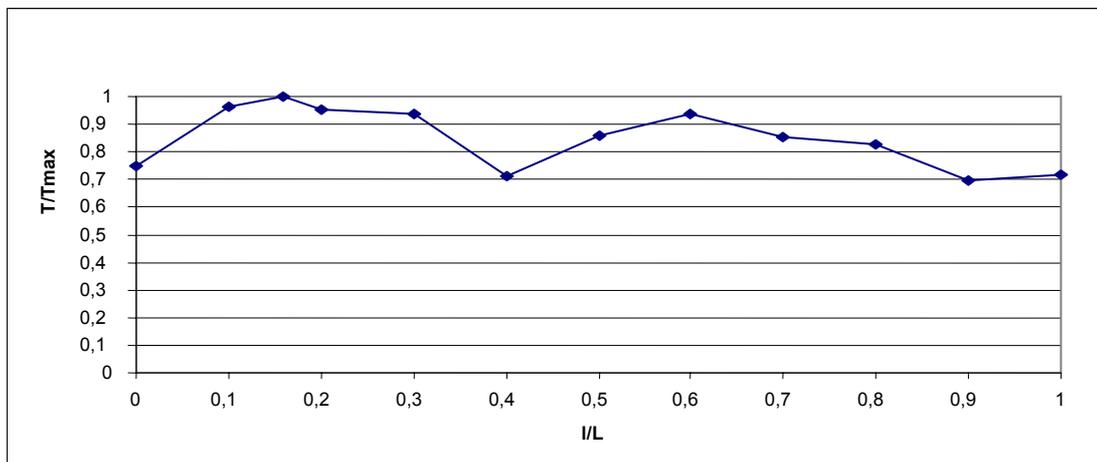


Figura 3.5.36. Perfil de temperatura de LI03.

3.5.3. Resumen de los resultados obtenidos

La tabla 3.2 muestra un resumen de los principales datos procedentes de las seis imágenes termográficas consideradas para el análisis. Se incluyen en la misma la temperatura máxima y los valores relativos de temperatura mínimos ($(T/T_{\max})_{\min}$) localizados en un punto (I/L) sobre la línea recta correspondiente (LI01, LI02 y LI03).

Tabla 3.2. Resumen de comportamiento de temperatura en las imágenes 1 a 6*

Imagen	Temperatura máxima		(T/Tmax) min. - I/L	Observaciones
	Valor (K)	I/L (-)		
1	LI01	1272	0,76	- Las tres primeras imágenes corresponden a quemas prescritas (con viento entre 14 y 16 km/h). Las tres siguientes son quemas a escala laboratorio (sin presencia de viento). - LI01, LI02, LI03 identifican a líneas rectas (longitud de llama) sobre las que se efectúan las lecturas de temperatura. - La relación I/L indica la ubicación en la que se registra la temperatura máxima y la relación (T/Tmax) mínima.
	LI02	1283	0,24	
	LI03	1284	0,89	
2	LI01	1391	0,24	
	LI02	1313	0,40	
3	LI01	1216	0,24	
	LI02	1041	0,49	
	LI03	1216	0,34	
4	LI01	487	0,08	
	LI02	532	0,4	
5	LI01	500	0,23	
	LI02	496	0,11	
6	LI01	587	0,06	
	LI02	480	0,08	
	LI03	504	0,16	

* Imágenes 1, 2 y 3: quema prescrita (cañaveral)
Imágenes 4, 5, y 6: incendio a escala de laboratorio.

3.6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

- En el caso de la quema prescrita, las temperaturas máximas están comprendidas entre 1391 K y 1041 K, con un valor promedio de 1250 K. En el caso del incendio a pequeña escala, las temperaturas son considerablemente menores, estando comprendidas entre 587 K y 480 K (valor medio: 510 K).
- Las temperaturas máximas en la quema prescrita se registraron en un punto intermedio entre la base de la llama y el extremo superior (punta de la llama), con una posición variable comprendida entre el 24 % y 89 % de la altura del frente de llama, siendo su posición más frecuente la correspondiente al 24 %. Las temperaturas mínimas en la mayoría de los casos se localizaron en la región superior de la llama (en la punta o muy cerca de la misma; sólo en dos ocasiones - consideradas no representativas - se registraron temperaturas mínimas en la base de la llama).
- En los ensayos de laboratorio se observa en todos los casos una mayor uniformidad (menores fluctuaciones en la relación T/T_{max}), con temperaturas máximas en un punto situado entre la base y la zona media de la altura de la llama (los valores registrados fueron entre el 6 % y el 40 % de la altura del frente de llama). Esto ha de atribuirse al menor tamaño de las llamas, así como a la menor turbulencia de las mismas.
- En la quema prescrita, en contraste con los experimentos a escala de laboratorio, se registró una mayor dispersión de los datos, observándose las temperaturas más altas y los valores más bajos de la relación T/T_{max} . Esto se debe a las altas cargas de combustible (tiempos de residencia mayores) y a la presencia de viento, el cual colabora en la eficiencia de la combustión y en la generación de turbulencias. Lo anterior es fácilmente observable en las imágenes termográficas donde se captan las variaciones (de temperatura y geometría) en toda la superficie visible de la llama.
- Las quemas prescritas presentaron, evidentemente, las características correspondientes a un incendio real (valores de temperatura y turbulencias). Sin embargo, y pese a la considerable diferencia de escala, las imágenes de los incendios a pequeña escala tenían un aspecto similar a las obtenidas en las quemas prescritas.
- En los grandes incendios donde se presentan llamas con flujos turbulentos se observan significativas fluctuaciones (tanto en las características geométricas como en los parámetros termofísicos), por lo que un valor promedio de temperatura no es necesariamente un valor representativo de la temperatura superficial de la totalidad de la llama visible.
- Aun sin las grandes turbulencias de un incendio de copas, los diversos histogramas correspondientes a la distribución por clases de la quema prescrita muestran que un sólo valor únicamente representa a una pequeña área (la desviación estándar confirma esta afirmación). Una aproximación más cercana a la realidad es la

división de la llama en secciones, donde los valores extremos de la llama (T máxima y T mínima) no representan un área muy grande de la misma.

- Todos estos resultados ponen de manifiesto las limitaciones de la suposición realizada frecuentemente de temperatura de llama constante. Es evidente que un trabajo exhaustivo sobre este tema sería de gran interés y podría permitir el establecimiento de pautas para la predicción de la distribución aproximada de las temperaturas en los diversos tipos de incendios forestales. Este trabajo se está realizando actualmente en nuestro grupo (Pastor, 2004).

3.7. NOMENCLATURA

Emis	Emisividad, -
Hum	Humedad, %
l	Longitud, m
L_{\max}	Longitud máxima, m
T	Temperatura, K
T_{\max}	Temperatura máxima, K
Stdev	Desviación estándar, -