

Anejo 1. Análisis del flujo rasante mediante digitalización de imágenes de video

1. Introducción

El autor de este trabajo dirigió durante el curso 98–99 una tesina de grado en la Escuela de Caminos, Canales y Puertos de la U.P.C. cuya reseña es la siguiente:

Quintilla, R. (1999). "Caracterización del flujo rasante sobre un aliviadero escalonado en presas de HCR. Aplicación de la técnica de digitalización de imágenes". Tesina de grado de la E.T.S. Enginyers de Camins, Canals i Ports. UPC. Barcelona. 108 pp.

En ella se procedió a aplicar la técnica de digitalización de imágenes de vídeo para su postproceso mediante el programa DIGIMAGE elaborado por el Departamento de Matemáticas y Física Teórica de la Universidad de Cambridge, para caracterizar el flujo rasante sobre un aliviadero escalonado. El programa permite analizar en el tiempo los valores de la intensidad luminosa del campo de grabación. Así se pretendió describir el comportamiento del flujo en ciertas secciones de registro y para distintos caudales.

DIGIMAGE es una de las herramientas más a la vanguardia en el campo de la dinámica de fluidos. Más que un sistema de procesamiento de imágenes, es un sistema de procesamiento de secuencias de vídeo, que ofrece los útiles necesarios para caracterizar el movimiento de un fluido no sólo en cuanto a sus dimensiones espaciales sino también en cuanto a sus características en el tiempo.

2. Equipo de trabajo

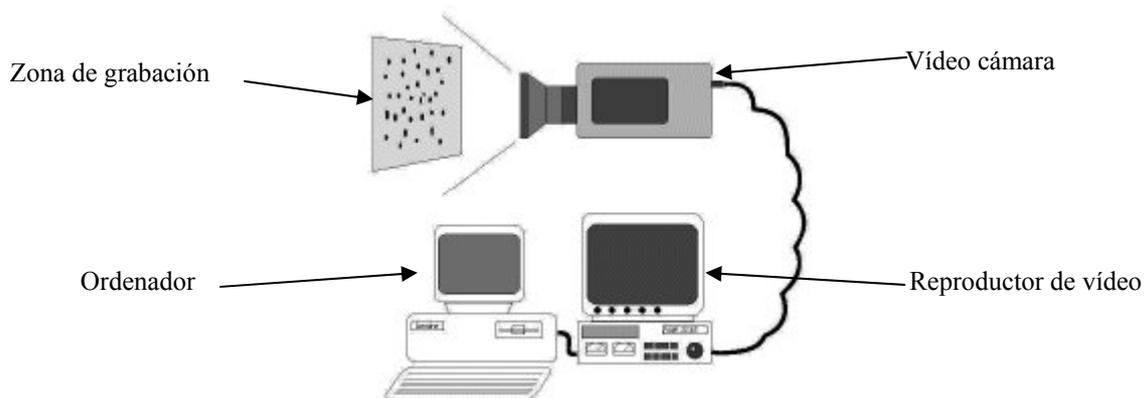


Figura 1. Esquema del equipo utilizado para el desarrollo de los ensayos y su posterior tratamiento.

El equipo de ensayo consistió básicamente en una cámara de vídeo doméstica JVC Videomovie GR–AX–7EGBK VHS Pal, a través de la cual se procedió a registrar secuencias del flujo circulando sobre la estructura en varias posiciones de la misma y para varios caudales. Una vez se obtuvieron las películas a procesar, se procedió a digitalizarlas a través del equipo reproductor de vídeo (se dispuso de dos equipos: Panasonic NV–J45 y AKAI VS–X4800) que se encuentra conectado al ordenador a través de una tarjeta analógico–digital. En la Figura 1 se esquematiza el citado equipo

2. 1. Descripción del programa DIGIMAGE

El proceso de digitalización de la secuencia de vídeo a analizar consiste en asociar a cada punto de la imagen (píxel) el valor de su intensidad luminosa. Así, la escala de intensidad va del valor 0 (negro) al 255 (blanco), por tal motivo recibe el nombre de escala de grises. El software trata la imagen como un conjunto de puntos (píxel) de una cuadrícula de 512 x 512. Para localizar los citados puntos utiliza un sistema de coordenadas con origen en el extremo superior izquierdo de la pantalla. Para poder apreciar mejor los diferentes valores asociados a la intensidad, DIGIMAGE dispone de diversas escalas de falso color, de manera que a cada valor de la intensidad se le asocia un color, de esta manera se crea una imagen ficticia que permite determinar que puntos poseen una intensidad luminosa mayor. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de imagen congelada digitalizada.



Figura 2. Imagen digitalizada en escala de falso color. La intensidad luminosa es más baja para los colores más oscuros y tanto más elevada cuánto más claros.

DIGIMAGE dispone de capacidad para almacenar hasta 16 imágenes congeladas. Una vez captada y almacenada una imagen puede ser procesada según las diversas opciones del programa.

DIGIMAGE permite adquirir y almacenar una sola imagen congelada o una secuencia de éstas. Una vez almacenadas, se podrá llevar a cabo operaciones aritméticas con cada imagen.

A cada imagen se le puede asignar un sistema coordenado propio, lo que permite ubicar de manera exacta los puntos de referencia que se disponga en las imágenes, y de esta manera caracterizar con exactitud el tamaño de la zona analizada.

Tal y como los propios creadores destacan en su página *web*¹ el control temporal de las imágenes es uno de los aspectos más destacados del programa. DIGIMAGE permite fijar filas y columnas en una cierta secuencia y analizar la evolución en el tiempo, de las intensidades de luz. En la Figura 3 se muestra un ejemplo de la evolución temporal durante 20 segundos de la intensidad de luz en una columna. Fijando filas y columnas se podrá estimar la evolución en el tiempo de la intensidad de luz en una superficie delimitada.

El programa también permite determinar la localización de contornos, dibujando líneas de igual intensidad de luz. Así como aplicar diversos tipos de filtros a las imágenes con el objetivo de buscar una mayor nitidez de las mismas.

¹ Dirección de la página web: <http://www.damtp.cam.ac.uk/user/fdl/people/sd/digimage/index.htm>

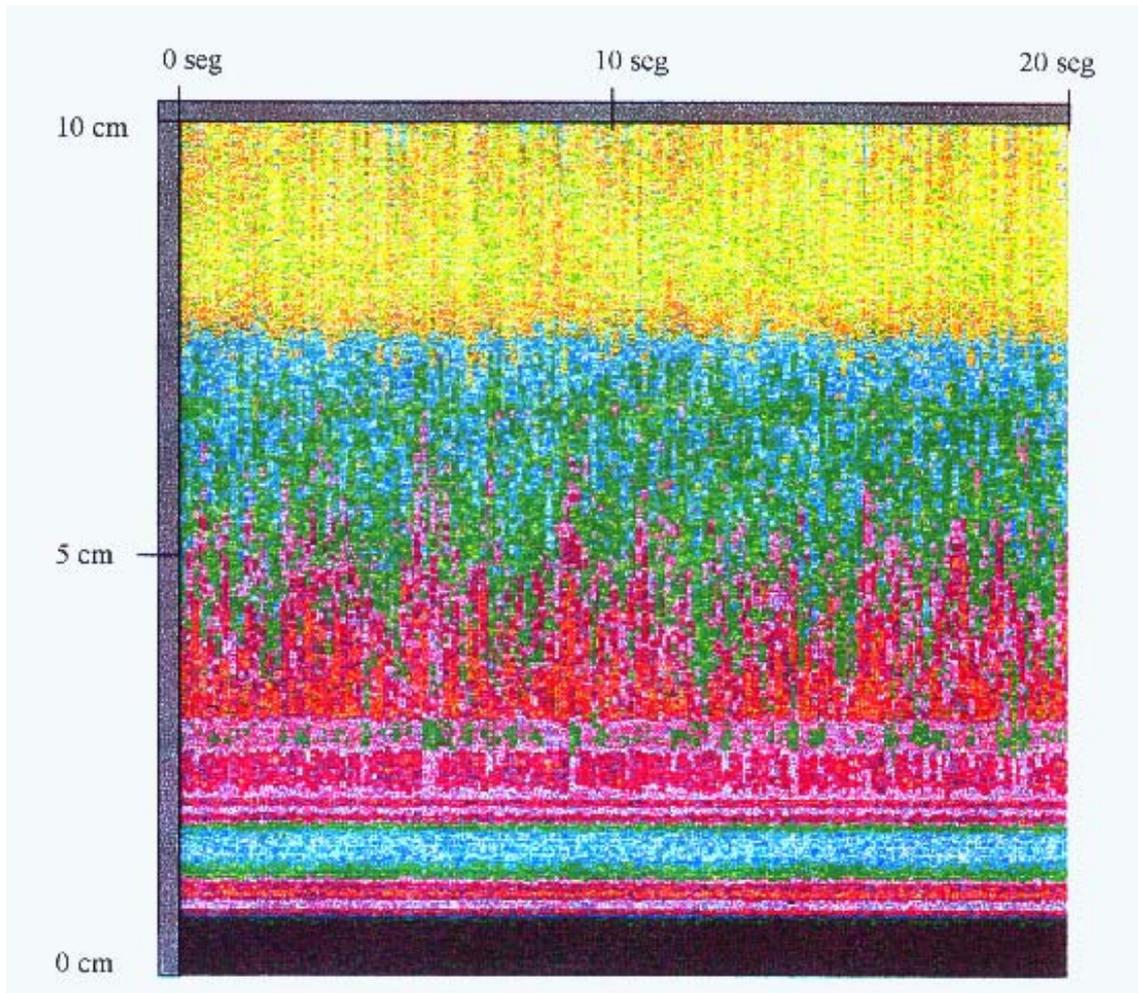


Figura 3. Evolución temporal durante 20 segundos, de la intensidad de luz en una columna.

3. Objetivos del estudio

3. 1. Estimación cualitativa de la intensidad turbulenta del flujo

La posibilidad de analizar las series temporales a partir de columnas y filas fijadas en la imagen permite estudiar una malla perfectamente delimitada a priori. A partir de dicha malla se podrá analizar el comportamiento en el tiempo de la intensidad de luz que se ha registrado en el proceso de digitalización. Las variaciones de la intensidad de luz darán idea del comportamiento del fluido. En los gráficos de la Figura 4 se muestran las discretizaciones utilizadas en función de la zona de estudio del flujo.

Los promedios de las series temporales citadas, tan solo aportarán información cualitativa de las características del flujo medio.

Las variaciones que a lo largo del tiempo presente la intensidad luminosa, serán debidas a la propia variabilidad del flujo, es decir, a la intensidad de la turbulencia en aquel punto. Por tanto la estimación de la variabilidad de la intensidad de luz (varianza), debería ser un estimador cualitativo de dicha intensidad turbulenta. Así pues, un objetivo importante fue estimar, aunque fuera cualitativamente, los mapas de varianza (o desviación típica) de las series temporales de la intensidad de luz en cada uno de los puntos de las mallas definidas anteriormente.

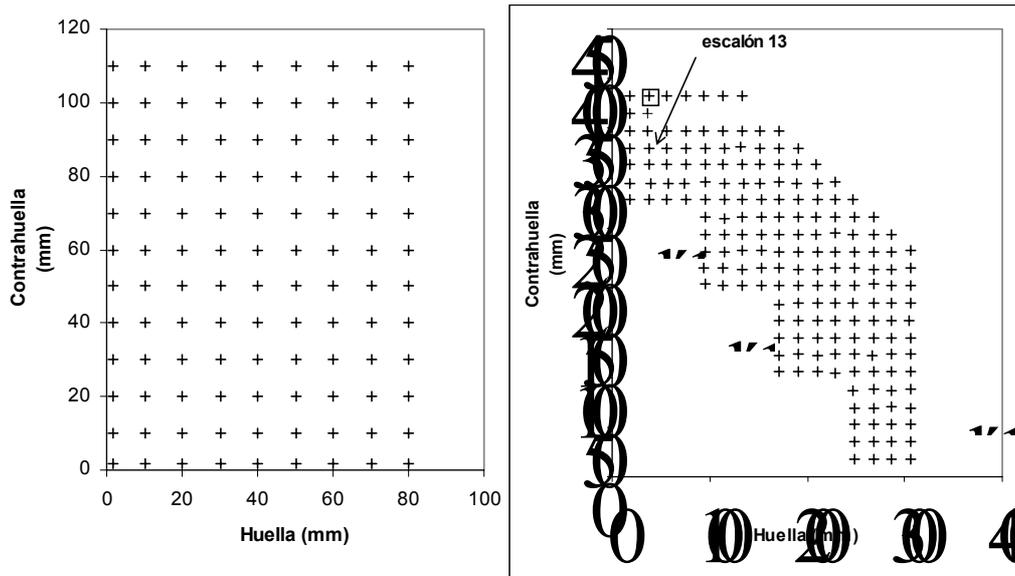


Figura 4. Mallas de trabajo para la discretización de las áreas de estudio.

3. 2. Escalas integrales temporal y espacial

La aplicación de DIGIMAGE permitirá establecer el comportamiento, al menos cualitativamente, del flujo en lo que se refiere a las diferentes escalas de turbulencia que pueden encontrarse en él. Esto es, los diferentes tamaños de los remolinos que se formen en el vertido a lo largo de la rápida escalonada. Como es sabido, dichas escalas se caracterizan a nivel temporal y a nivel espacial. Es decir, los tiempos característicos y las dimensiones de los vórtices que se forman en el flujo rasante.

Se define la escala integral temporal como:

$$L_t = \int_{-\infty}^{\infty} R_t(\tau) d\tau \tag{1}$$

donde R_t corresponde al coeficiente de correlación entre dos instantes t y $t+\tau$, referido a una variable medida en un determinado punto. Si esta variable es v , la correlación se define a partir de la covarianza y la varianza, como:

$$R_t(\tau) = \frac{Cov(v(t), v(t-\tau))}{Var(v)} \tag{2}$$

Así, particularizando al caso de la medida de la intensidad de luz de un píxel, el valor del área definida en (1) estaría relacionada con el tiempo característico de giro del vórtice que pasa por el punto (píxel) que se esté analizando.

En la Tabla 1 se muestran los primeros pasos para la preparación de la serie temporal de uno de los puntos de la malla. Una vez se dispone de las diferentes series desplazadas un ΔT , se procede a estimar las correlaciones de la serie original con todas las demás. Se obtendrá un gráfico análogo al de la Figura 5.

Tabla 1. Preparación de la serie temporal para obtener su autocorrelación.

Instante	I_i	I_{i-1}	I_{i-2}
t_1	i_1		
$t_1 + \Delta t$	i_2	i_1	
$t_1 + 2\Delta t$	i_3	i_2	i_1
$t_1 + 3\Delta t$	i_4	i_3	i_2
...
Coeficiente de correlación	$R_{00}=1$	R_{01}	R_{02}

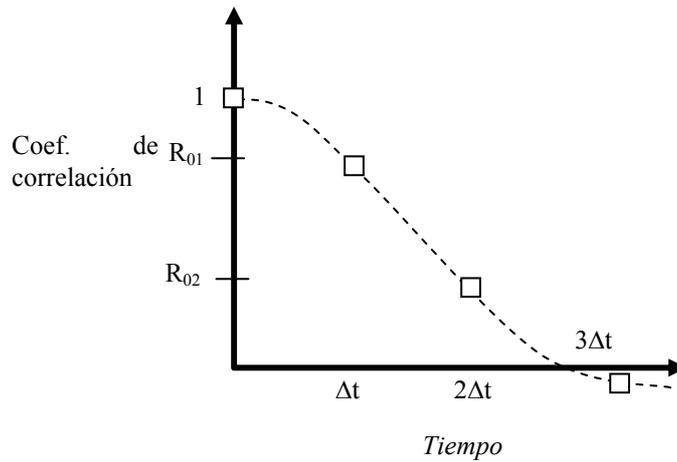


Figura 5. Correlograma obtenido de las series temporales desplazadas Δt .

En este correlograma se apreciará que a partir de un cierto instante $n\Delta t$ la correlación caerá pudiendo llegar a ser negativa. Como primera aproximación se ha calculado el área bajo el intervalo $[0, n\Delta t]$ en el que la correlación es positiva. Dicha área tendrá dimensiones de tiempo y será un valor característico de la serie temporal analizada: dará una idea del tiempo en que la característica estudiada en el punto e instante dados está influyendo al comportamiento de dicha variable (en este caso la vorticidad en la intensidad de iluminación del píxel).

Análogamente, se definirá la escala integral espacial como:

$$L_e = \int_{-\infty}^{\infty} R_e(x_1) dx_1 \tag{3}$$

donde R_e corresponde al coeficiente de correlación entre dos puntos x y $x+x_1$ para un instante dado:

$$R_e(x_1) = \frac{Cov(v(x), v(x+x_1))}{Var(v)} \tag{4}$$

Es decir, se tratará en este caso de analizar la evolución de las áreas bajo los correlogramas que se obtendrán relacionando los valores de la intensidad luminosa de un punto con los valores en otros puntos que disten del inicial un valor conocido. Se fijará un punto como referencia y se evaluarán las correlaciones de los demás con éste. El proceso de esquematiza en la Tabla 2.

<i>Tabla 2. Preparación de las series temporales para obtener las correlaciones de un punto con los demás.</i>			
Instante	I₁	I₂	I₃
t ₁	i ₁₁	i ₂₁	i ₃₁
t ₁ + Δt	i ₁₂	i ₂₂	i ₃₂
t ₁ + 2Δt	i ₁₃	i ₂₃	i ₃₃
t ₁ + 3Δt	i ₁₄	i ₂₄	i ₃₄
...
Distancia al punto 1	0	x ₁₂	x ₁₃
Coeficiente de correlación con el punto 1	R ₁₁ =1	R ₁₂	R ₁₃

El área encerrada entre el eje de abscisas y el correlograma hasta el punto donde la correlación se hace negativa es una estimación, en primera aproximación, de la escala integral espacial. El valor de dicha escala dará una idea de la distancia a la que se encuentra el punto más alejado del punto tomado como referencia (punto x), que influye en la variable analizada, en este caso la intensidad de iluminación co-

respondiente a dicho punto de referencia, lo que podrá estar dando una idea del tamaño del vórtice que se sitúa en él.

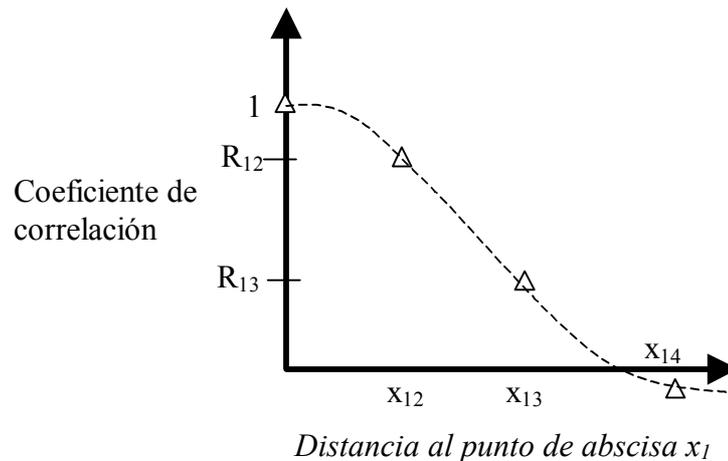


Figura 6. Correlaciones temporales obtenidas para el punto de abscisa x_1 en relación a otros puntos.

4. Resultados

4. 1. Comportamiento de los valores medios de la intensidad de luz

Como ya se ha comentado, los promedios de las series temporales tan solo aportarán una idea cualitativa de cómo se distribuye el flujo en la región de estudio. En la Figura 2 se había mostrado el comportamiento medio para una corta secuencia de imágenes. Es de destacar, en este caso, como en la zona del flujo rasante superior se observan 3 regiones. Desde el interior hasta el exterior se encuentran:

- Una zona amarilla: correspondiente a la zona de mayor intercambio de cantidad de movimiento entre el flujo rasante y la celda interior. En esta zona el perfil de velocidad muestra un máximo (p. e. Chamani y Rajaratnam (1999), Lejeune et al. (1994)), y el aspecto del flujo es de un blanco intenso, hecho que provocará que el sistema, en función de la iluminación, esté cercano a saturarse.
- Una zona azul, donde empieza el flujo a interactuar con la superficie libre. Una partícula de agua en esta zona, en función de la dirección que lleve su trayectoria, podrá ser arrastrada hacia la zona de mayor velocidad o bien expulsada a la zona superior en forma de salpicadura.
- Una zona verde, en la que se encuentra la superficie libre (y_{90} correspondiente a la altura de agua en la que se presenta una concentración de aire del 90% y que fue introducida por los investigadores que han analizado la variación de la concentración de aire en todo el espesor –Matos y Quintela (1998), Chamani y Rajaratnam (1999)–). Por encima de esta zona se observa otra región de tonos rojizos, en donde ya no existe flujo. Puede apreciarse en la frontera entre estas dos regiones la existencia de pequeñas áreas aisladas de color verde. Éstas corresponden a gotas de agua, salpicaduras que han sido lanzadas hacia el exterior.

4. 2. Comportamiento de la desviación típica de la intensidad de luz

Se ha relacionado cualitativamente la desviación típica de las series temporales para la malla definida en la zona de estudio con la intensidad de la turbulencia de la misma. En la Figura 7 se presentan dos gráficos que muestran como varía la desviación típica en la zona aledaña a un peldaño para los caudales $y_c/h = 1.68$ y $y_c/h = 1.85$.

Tal y como se ha comentado en el apartado 4. 1, en el primer punto de la descripción de la Figura 2, la iluminación del flujo, durante los momentos de grabación, será determinante a la hora de aplicar esta técnica. En la Figura 7 los dos mapas corresponden a sistemas diferentes de iluminación:

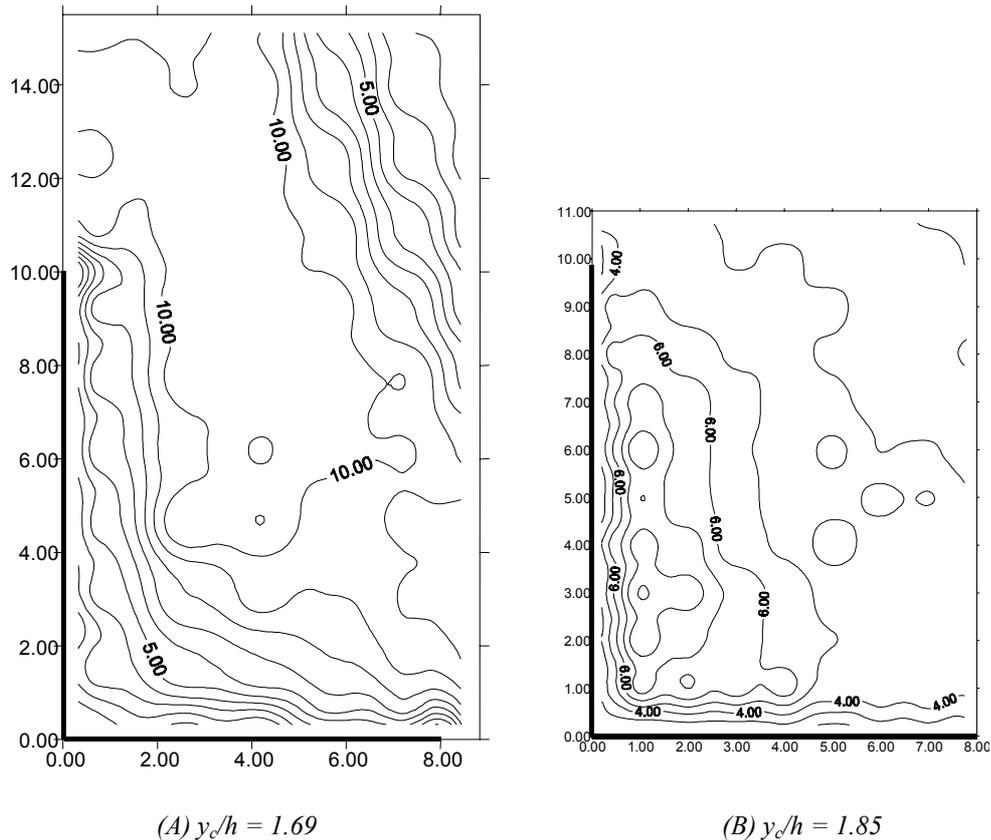


Figura 7. Comparación de los mapas de igual desviación típica de intensidades de iluminación en función del tipo de iluminación. (A) Iluminación natural. (B) Iluminación frontal con foco de 500W.

1. Caso (A). Con iluminación natural, se distingue con claridad la zona de contacto entre el flujo rasante superior y la celda interior. Se aprecia la mayor variabilidad de la intensidad de iluminación en esta zona, como se ha descrito anteriormente.
2. Caso (B). Iluminando con un foco de 500 w de potencia de manera frontal, aproximadamente a 0.50 m de la zona de grabación. Se observa como se pierde resolución en la zona de contacto, debido a que la fuente de iluminación artificial provoca valores de intensidad de iluminación cercanos a la saturación. Aunque por otro lado, se observa una mayor resolución en la zona del vórtice, obteniéndose valores crecientes hacia el centro de la celda.

Así pues, será importante establecer que aspecto del flujo interesa más destacar para iluminar en consonancia con ello. Es interesante mencionar que, en adelante se mostrarán resultados obtenidos iluminando frontalmente con el foco de 500 W a unos 0.50 m del cajero de la rápida (caso B).

4. 3. Escala integral temporal

Un equipo de vídeo doméstico como el utilizado, permite a DIGIMAGE registrar como máximo un valor de la intensidad de luz cada $\Delta t = 0.073$ s. Se observó a lo largo del estudio que estos 73 ms podría ser un intervalo de tiempo demasiado grande para la obtención del correlograma. La explicación de ello puede encontrarse si se analiza cual es la mínima área que se puede estimar mediante la aplicación de esta metodología con el equipo de vídeo utilizado. El correlograma siempre partirá de 1, correspondiente a la correlación de la serie completa consigo misma –desplazamiento de 0 segundos–. Suponiendo que al realizar la segunda correlación de la serie con ella misma al desplazarla $1/\Delta t$ el valor resultara ya próximo a cero o a negativo, el área que se estimaría sería,

$$\text{Área} = L_t = \frac{1}{2} \cdot 73 = 36.5 \text{ms} \quad (5)$$

Es decir el sistema no podrá dar valores de tiempo inferiores a 37 ms. Ello podrá ser un problema para los caudales elevados, en los cuales los tiempos característicos de los vórtices que se forman tienden a reducirse.

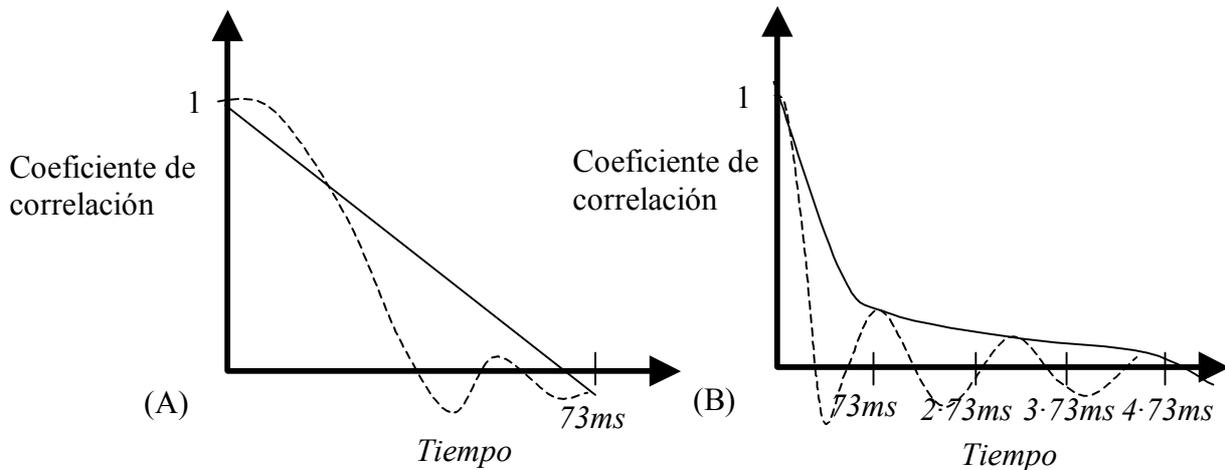


Figura 8. Problemas observados en la estimación de la escala integral temporal asociados con la resolución del sistema.

En la Figura 8(A) se esquematiza el problema mencionado. En ella en trazo continuo se muestra el correlograma que se obtendría directamente de la serie temporal estudiada. En trazo discontinuo se presenta el correlograma que hipotéticamente sería el real. Se aprecia que en el segundo caso el área que se obtendría entre el correlograma y el eje de abscisas (entre 0 y el punto donde la correlación cambia de signo) sería mucho menor que la mínima que permite estimar el equipo utilizado.

Para el caudal mayor ensayado ($y_c/h = 1.85$) además de este fenómeno se detectaron ciertos casos en los que los correlogramas estimados presentaban el corte con el eje de abscisas para unos valores extrañamente elevados de tiempo. En la Figura 8(B) se esquematiza este fenómeno. La explicación debe buscarse en que la rápida variación del flujo hace que la autocorrelación varíe muy rápidamente alrededor del cero. Puede ser que en los puntos de medida (múltiplos de 73 ms) el valor del coeficiente de correlación dé un valor positivo –curva de trazo continuo–, aunque muy cercano a cero, y no obstante su correlograma real –positivo –curva de trazo discontinuo– se haya anulado para un valor inferior a 73 ms.

En la Figura 9 se muestran las correlaciones obtenidas para la serie temporal registrada en el punto $y/l = 0.25$ y $z/h = 0.20$ de los escalones $L/k_s = 71.71$, $L/k_s = 69.66$, $L/k_s = 67.61$ y $L/k_s = 65.53$, obtenidas para tres caudales distintos $y_c/h = 0.891$, $y_c/h = 1.41$ y $y_c/h = 1.85$. Obsérvese como para el menor de los caudales en todos los peldaños el comportamiento de la función de autocorrelación corresponde a una función monótona decreciente al aumentar el desplazamiento del tiempo.

Con el caudal intermedio se aprecian casos del comportamiento anómalo descrito anteriormente, en el que la función de autocorrelación deja de ser monótona decreciente (caso $y_c/h = 1.41$ para el escalón $L/k_s = 69.66$), siendo éste un comportamiento ilógico pues indicaría que dados los registros en dos instantes de tiempo consecutivos, el más alejado en el tiempo se vería más influido por el instante inicial que el más cercano. Esta anomalía se reproduce más claramente en el caso del mayor caudal. En éste, la curva de autocorrelación para el peldaño $L/k_s = 67.61$ corta al eje de abscisas en un instante extrañamente alejado del origen, mostrando de nuevo un comportamiento no monótonamente decreciente. Además en este caso, la autocorrelación correspondiente al peldaño $L/k_s = 65.56$ cae por debajo de cero para la primera correlación estimada, entre la serie original y la desplazada tan solo un Δt . En vista de las dificultades que presentaron los dos mayores caudales ensayados, en adelante se mostrarán únicamente los resultados obtenidos para $y_c/h = 0.891$. Cabe recordar que según lo expuesto a lo largo de esta Tesis, el caudal $y_c/h = 0.891$ no da lugar, de una forma clara, a un flujo rasante, situándose en la frontera entre el flujo escalón a escalón y flujo rasante.

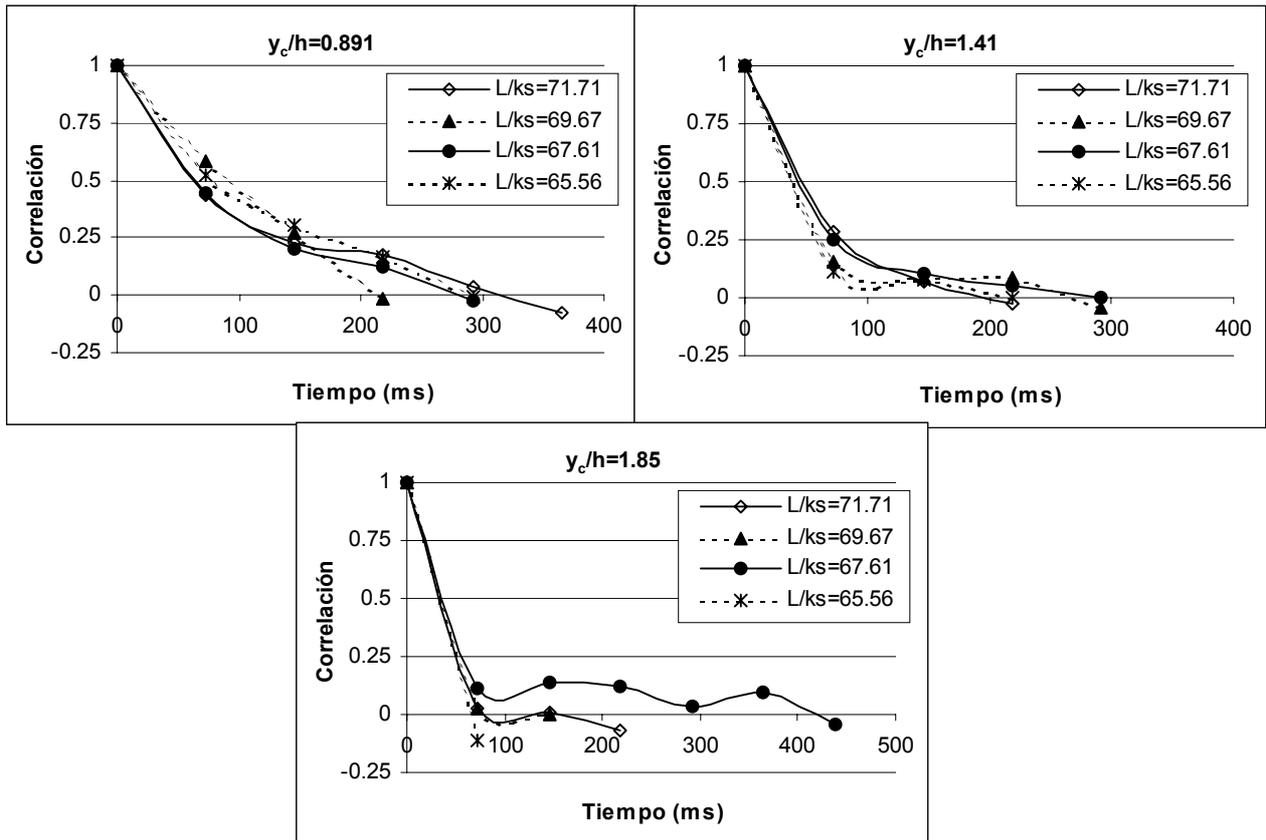


Figura 9. Evolución de las correlaciones para tres caudales distintos, obtenidas en un punto situado a $y/l = 0.25$ (sobre la huella) y $z/h = 0.20$ (sobre la contrahuella) en los cuatro escalones indicados en las leyendas.

En la Figura 10 se muestran los valores de la escala integral temporal (L_t) obtenidos en el punto $y = 2cm$ (sobre la huella) y $z = 2cm$ (sobre la contrahuella) de los cuatro peldaños ensayados.

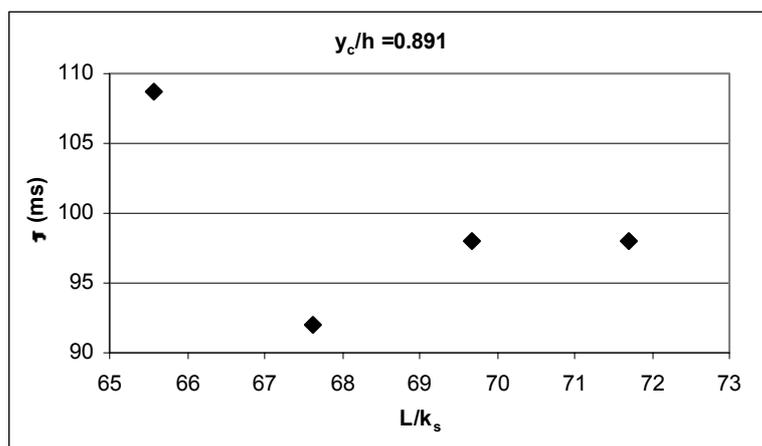


Figura 10. Evolución de la escala integral temporal en el punto $y/l=0.25$ de la huella, y $z/h=0.20$ de la contrahuella, según el peldaño ensayado para el caudal $y_c/h=0.891$.

Reproduciendo estas estimaciones para todos y cada uno de los puntos de malla de la zona de estudio (ver Figura 4), se podrá obtener el mapa de tiempos característicos (L_t) que se muestra en la Figura 11.

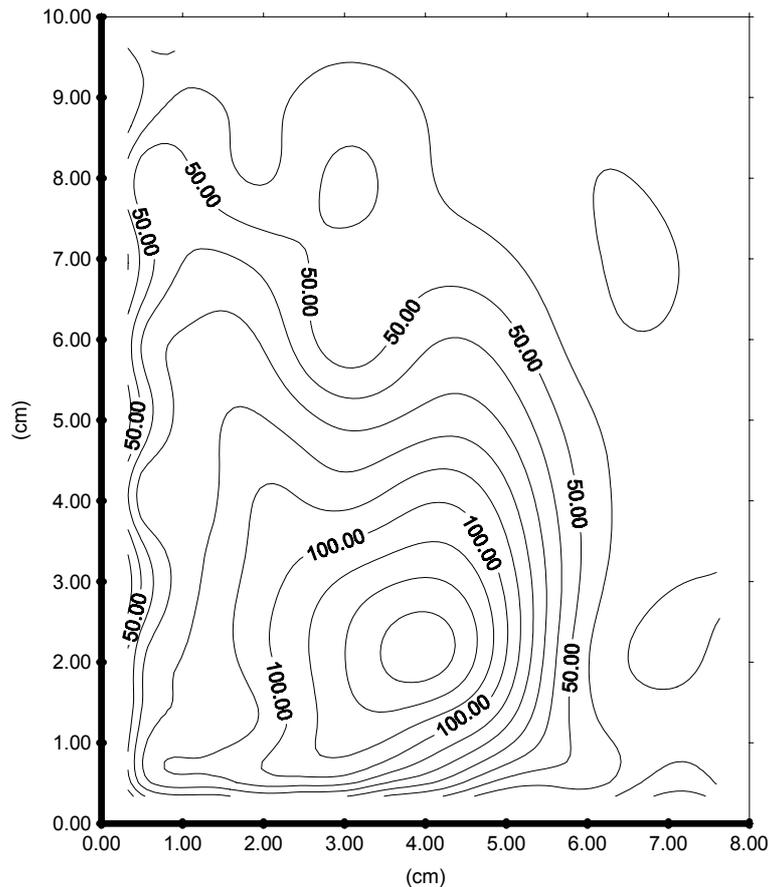


Figura 11. Mapa de la escala integral temporal (en ms) para el peldaño $L/k_s = 69.67$, y para un caudal $y_c/h = 0.891$.

Obsérvese en esta figura como en la zona de flujo rasante los valores de la escala integral temporal se encuentran entre 30 y 45 ms que corresponde al orden de magnitud de la precisión del equipo de grabación. Seguramente en esta zona los valores tenderían ser algo menores, pero el sistema no pudo captarlos. Los resultados parecen mostrar la tendencia a que las características del flujo en un instante dado persistan durante más tiempo, a medida que nos acercamos al centro de la celda encerrada entre el flujo rasante principal y el peldaño.

4. 4. Escala integral espacial

La resolución en este caso no vendrá condicionada por la frecuencia de captura de imágenes por parte de la cámara de vídeo, sino por otros dos aspectos:

1. Que los valores registrados en los distintos puntos de la malla de estudio sean simultáneos. Ello está garantizado por el hecho de que la base del registro corresponde a un lapso de 20 segundos de película, y a partir de ella se obtiene la evolución en el tiempo en cada uno de los puntos de la malla de la intensidad de luz.
2. Que los puntos de la malla considerados se encuentre suficientemente próximos entre sí como para que la correlación no se pierda en el primer o segundo punto. Si un punto se encontrara demasiado alejado del punto considerado como referencia, la correlación de las series temporales de intensidad de luz entre ambos caería rápidamente a valores cercanos a 0. Así, si la mínima distancia entre dos puntos de la malla es de 0.8 cm en una dirección cualquiera de la misma, el valor mínimo del área que se obtendría entre el correlograma y el eje de abscisas sería:

$$\text{Área} = \lambda = \frac{1}{2} \cdot 0.8 = 0.4 \text{ cm} \quad (6)$$

Por ello, valores de la escala integral espacial menores o iguales a 0.4 cm indicarían la necesidad de disponer de una malla algo más densa. En la Figura 12 se muestra un esquema de un posible fenómeno de falta de resolución de la malla elegida.

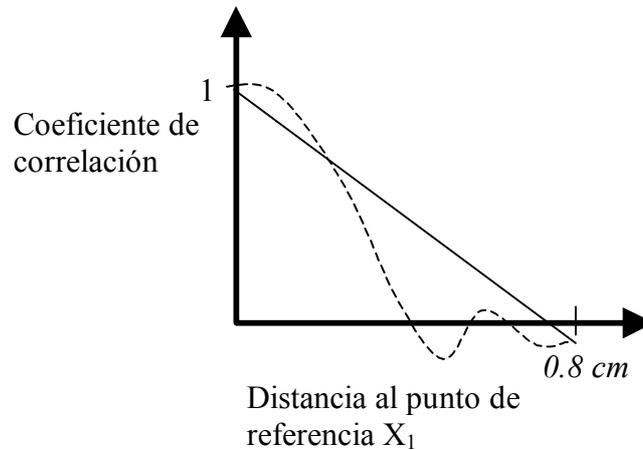


Figura 12. Situación de falta de resolución en la malla elegida.

Es importante mencionar que, con una discretización como la mostrada en la anterior Figura 4 no se detectó el problema anterior.

En la Figura 13 se muestra un ejemplo de la evolución de los coeficientes de correlación entre los puntos de las diversas columnas, definidas por su distancia a la contrahuella (ver Figura 4), tomando como punto de referencia, en cada vertical, el más cercano a la huella (a una distancia de 0.2 cm). A continuación se procedió a calcular las áreas de dichos correlogramas, que corresponderá a la estimación de la escala integral espacial (L_e). En la Figura 14 se muestran los resultados obtenidos para los puntos citados. Nótese como el área bajo el correlograma aumenta a medida que se analizan puntos más alejados de la contrahuella, observándose un máximo alrededor de unos 2 cm de la cara vertical del peldaño, con un valor de L_e entre 2 y 2.5 cm. A continuación el valor de L_e empieza a descender hasta un valor cercano a 1.5 cm a unos 4 cm de la contrahuella, y a partir de aquí vuelve a ascender de nuevo hasta un valor de L_e cercano a 2.5 cm a medida que se acerca a la arista externa del escalón.

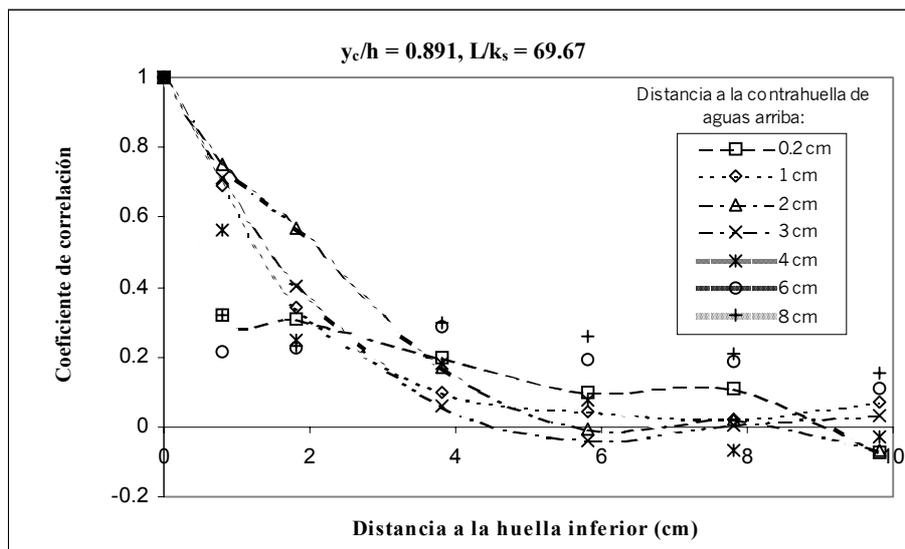


Figura 13. Correlogramas para el caudal $y_c/h = 0.891$ y el peldaño $L/k_s = 69.67$, para las columnas que distan de la contrahuella la distancia de la leyenda. Correlaciones tomando como punto de referencia, en cada vertical, el más cercano a la huella (a una distancia de 0.2 cm).

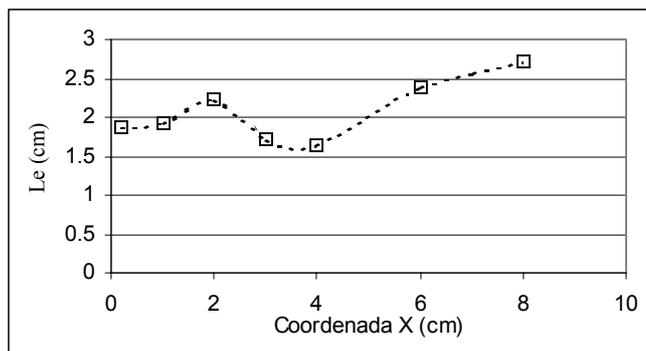


Figura 14. Valores de la escala integral espacial (L_e) para los puntos de más cercanos a la huella del peldaño $L/k_s = 69.67$.

Un comportamiento análogo al descrito se obtuvo para los otros tres escalones analizados ($L/k_s = 71.71$, $L/k_s = 67.61$ y $L/k_s = 65.56$). Reproduciendo las estimaciones correspondientes al escalón $L/k_s = 69.67$ tomando como punto de referencia todos y cada uno de los puntos de la malla de estudio (a partir de las correlaciones en la dirección vertical), se pudo obtener un mapa de valores de igual de escala integral espacial (L_e). En la Figura 15 se muestra el resultado obtenido para el escalón $L/k_s = 69.67$ y un caudal $y_c/h = 0.891$. Nótese como los valores máximos se obtienen en la zona del flujo rasante encontrándose entre 4 cm y 6 cm, que es del orden de magnitud del espesor del chorro rasante principal (incluida la aireación). En los puntos interiores a la celda los valores de L_e varían desde 4 cm en la zona más próxima al flujo rasante hasta 1 cm o menos cerca del contorno. Así, en la zona del flujo rasante, los remolinos de mayor tamaño al combinarse con la trayectoria descendente de las partículas conducirán a unos remolinos de forma helicoidal que será la responsable de las salpicaduras hacia el exterior de la superficie libre y del intercambio de partículas entre el flujo rasante y la celda inferior, intercambio descrito por Sorensen (1985) o Mateos y Elviro (1992) al inyectar ambos colorante al flujo.

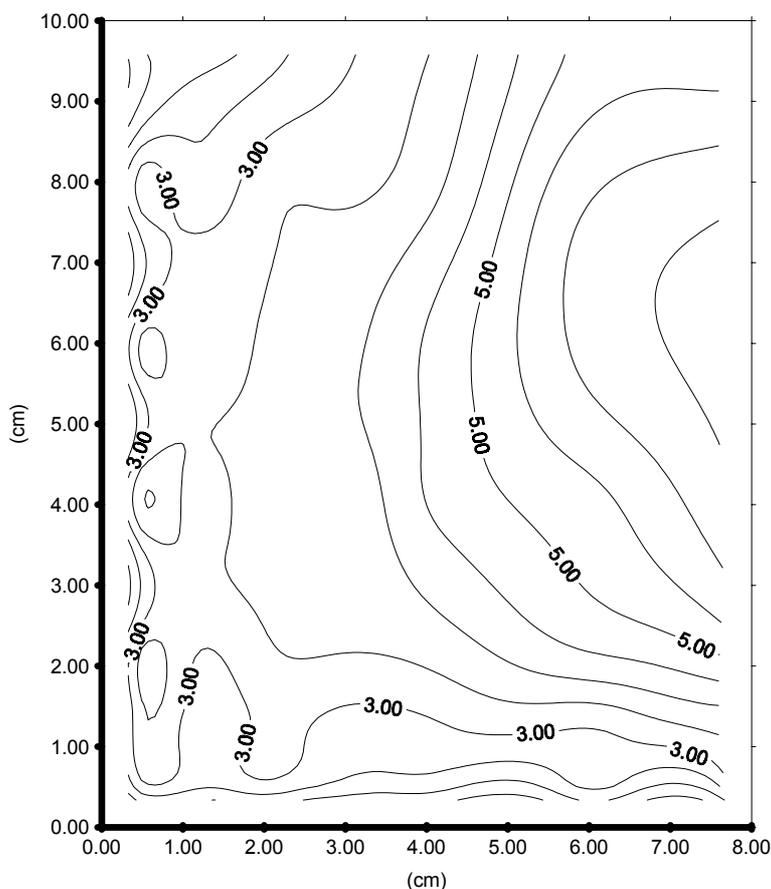


Figura 15. Mapa de la escala integral espacial (en cm) para el peldaño $L/k_s = 69.67$ y para un caudal $y_c/h = 0.891$.

4. 5. Velocidad característica

De las estimaciones realizadas en los anteriores apartados puede deducirse una velocidad característica:

$$v = \frac{L_e}{L_t} \quad (7)$$

Realizando esta simple operación se obtiene el gráfico de la Figura 16. En este gráfico se observa la existencia de un gradiente importante de velocidad en la zona que separa las dos circulaciones de agua (flujo rasante superior y la celda inferior). Hay que tener en cuenta que los problemas que se han citado asociados a la precisión en la obtención de la escala integral temporal, hacen que estos valores pueden ser susceptibles de error, sobre todo en la zona correspondiente a la zona del flujo rasante.

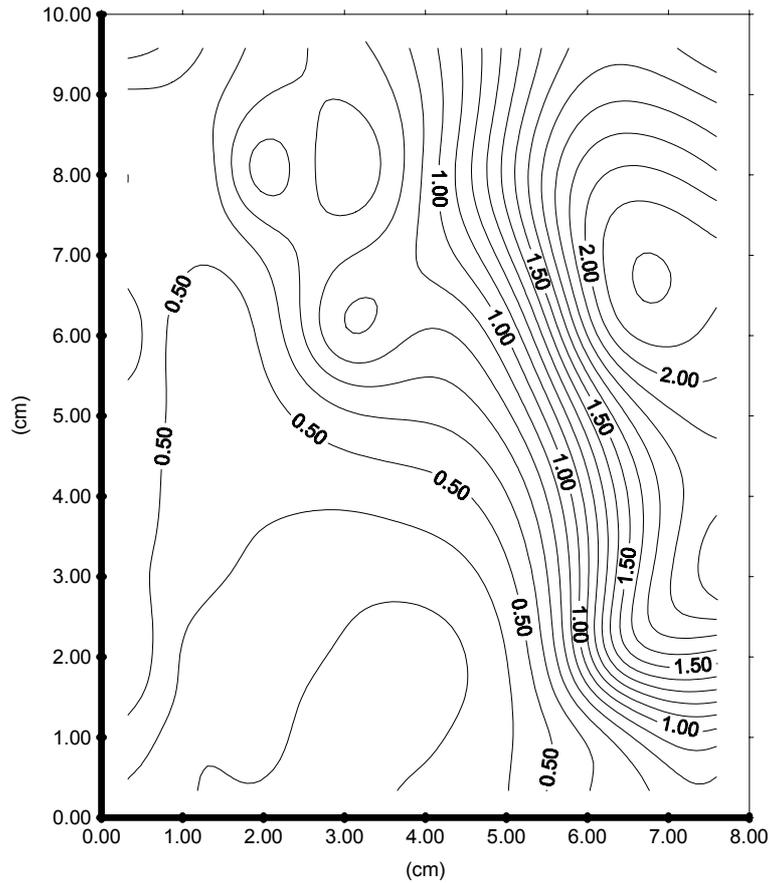


Figura 16. Velocidad característica (en m/s) del flujo rasante para el peldaño $L/k_s=69.67$, y para un caudal $y_c/h=0.891$.

