

CARACTERIZACIÓN DE VELOCIDADES Y LEY DE VARIACIÓN DEL NÚMERO DE FROUDE DENTRO DE RESALTOS HIDRÁULICOS

Luís G. Castillo Elsitdié, Belén Molina Miñano, José María Carrillo Sánchez

Línea prioritaria D. Seguridad de presas. Aspectos hidrológicos e Hidráulicos

Grupo de I+D+i Hidr@m. Departamento de Ingeniería Térmica y Fluidos.
Universidad Politécnica de Cartagena.

Escuela de Ingeniería Civil, Paseo Alfonso XIII, 52, 30203, Cartagena.

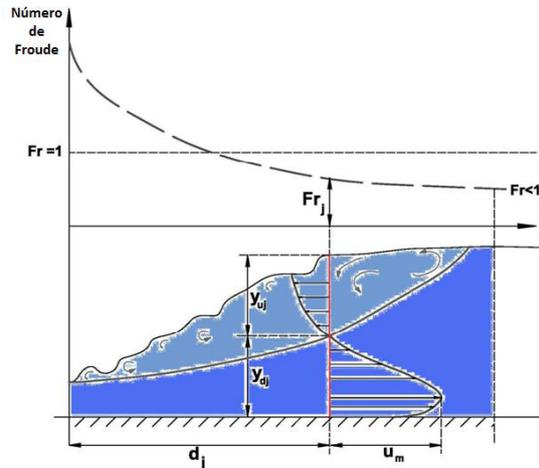
e-mail: luis.castillo@upct.es, belenmolina@upct.es, jose.carrillo@upct.es

En flujos bifásicos (agua-aire) y altamente turbulentos, los registros de velocidades obtenidos con un equipo ADV deben ser verificados y, de ser necesario, llevar a cabo un filtrado digital con el propósito de eliminar y/o corregir los datos anómalos, conservando las características fundamentales y la continuidad del registro.

Dos de los parámetros relevantes en la aplicación de los distintos métodos de filtrado son la aceleración y la velocidad, que para el caso de flujos turbulentos presentan diferentes particularidades. De este modo, en las mediciones realizadas dentro de resaltos hidráulicos, se propone que el umbral de aceleración λ_a se calcule en función de la posición del punto de medida d_j dentro del mismo y de su correspondiente número de Froude Fr_j :

$$\lambda_{aj} = Fr_j \sqrt{y_j} / (\Delta t \sqrt{g})$$

El valor y_j es igual a y_{dj} cuando el flujo del resalto se produce hacia aguas abajo, e igual a y_{uj} cuando es hacia aguas arriba (ver figura). Del análisis de los diferentes registros de velocidades instantáneas medidos dentro del resalto hidráulico, se ha llegado a establecer que el umbral debe ser $\lambda_{aj} \geq 0.5$.



Por otro lado, del análisis de los datos con diferentes criterios estadísticos, se debe establecer el umbral de velocidad más adecuado.

En ambos casos se analiza el mejor método de reemplazo del dato rechazado: media, mediana, media de los doce puntos que engloban al punto eliminado, etc.

Finalmente, se presenta la comparativa de los distintos métodos empleados, así como una ley de variación del número de Froude, dentro de distintos tipos de resaltos hidráulicos.

Caracterización de velocidades y ley de variación del número de Froude dentro de resaltos hidráulicos

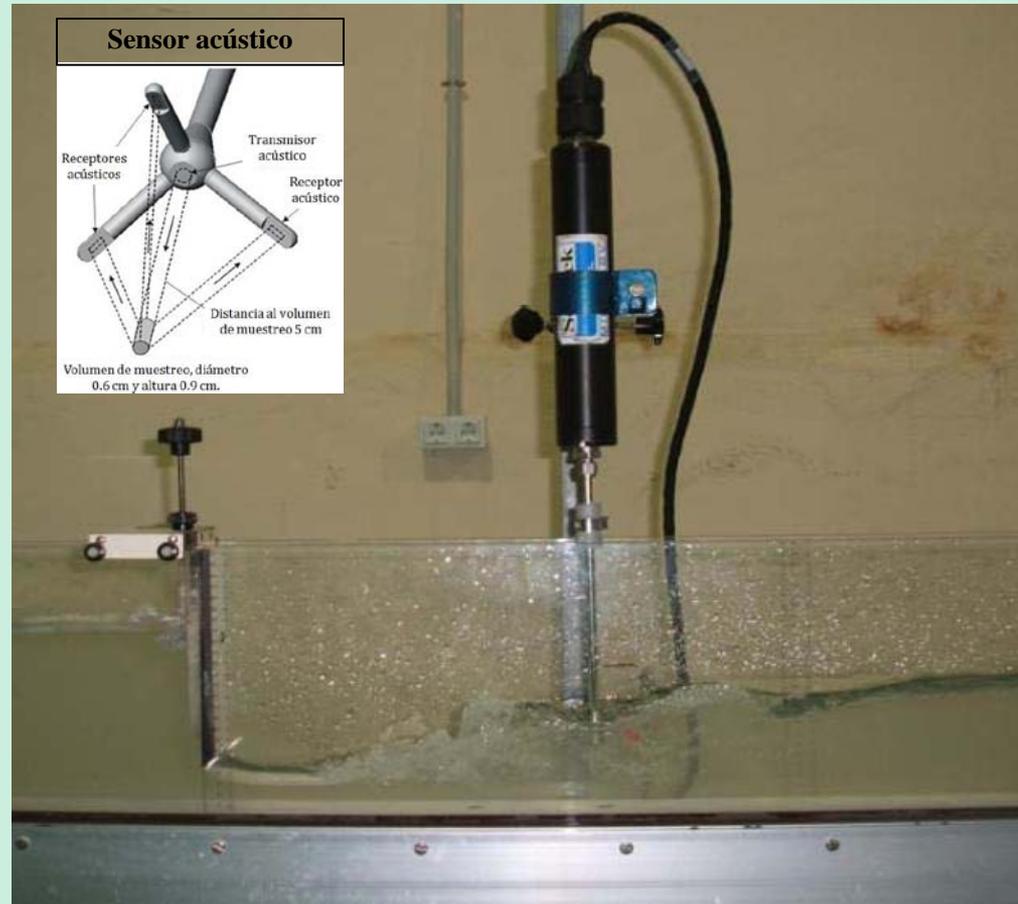
Luís G. Castillo Elsitié

Belén Molina Miñano

José María Carrillo Sánchez

Adquisición de velocidades instantáneas en flujos con instrumentación Acoustic Doppler Velocimeter (ADV).

- Útil en hidráulica para caracterizar el flujo: laboratorio o campo.
- Confiable en flujos laminares y turbulentos sin presencia de aire. **El agua constituye el elemento fundamental de transmisión de la señal.**
- En flujos altamente turbulentos y aireados, las señales se alteran por la interposición de burbujas de aire en la señal.



Causas de la contaminación de los registros de velocidades medidas con equipo Doppler ADV.

Ruido blanco

Señales parásitas complicadas de eliminar.

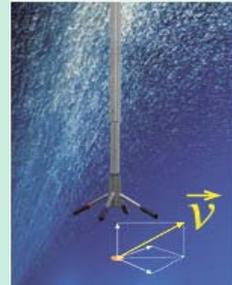
Turbulencia y aireación en flujos

Datos anómalos aleatorios por una mala recepción de la señal.

Ambigüedades por diferencia de fase

SOLUCIONES O MEDIDAS A.

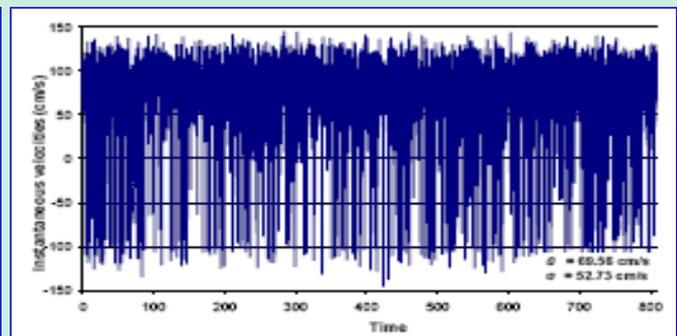
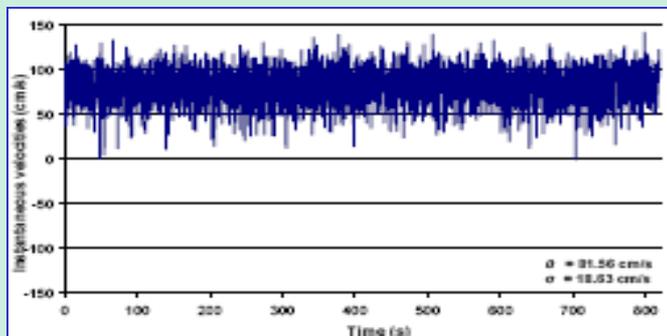
Blanckaert y Lemin (2006) proponen emplear sondas ADV de cuatro receptores.



Filtrado de datos

Rango de velocidad calibrado en el ADV	Máxima velocidad horizontal esperada	Máxima velocidad vertical esperada
± 3 cm/s	± 30 cm/s	± 8 cm/s
± 10 cm/s	± 60 cm/s	± 15 cm/s
± 30 cm/s	± 120 cm/s	± 30 cm/s
± 100 cm/s	± 300 cm/s	± 75 cm/s
± 250 cm/s	± 360 cm/s	± 90 cm/s

Tabla de calibración de límites de velocidades propuesta por Wahl (2003) en el programa WinADV.



Adquisición de velocidades instantáneas en flujos altamente turbulentos y aireados con instrumentación Doppler ADV.

Las señales sufren contribuciones de ruidos parásitos, “spikes”.

Los **spikes** son señales de amplitudes exageradamente desviadas del valor medio de la serie.

Pueden ser reducidos y/o eliminados por ajuste de los parámetros del equipo de medida, pero existen **situaciones en las que no pueden ser totalmente evitados.**

Un caso particular es el resalto hidráulico

RESALTO
HIDRÁULICO

Flujo bifásico (agua
y aire)



- Turbulencia y aireación.
- Fuerte disipación de energía y mezcla.
- Levantamiento brusco de la superficie libre.
- Generación de ondas y espray.

Procedimientos y tratamiento de datos.

El proceso de análisis para considerar un dato como “spike” involucra dos pasos:

- DETECCIÓN → Umbrales (aceleración, velocidad, corte de percentiles y/o estadísticos...).
- REEMPLAZO → Parámetros estadísticos o físicos (media, mediana, media de los doce puntos que engloban al punto eliminado, etc.).

Algunos métodos de filtrado de datos.

- Método del umbral de aceleración y velocidad, ATM+C (Castillo, 2009). (Basado en el método ATM de Goring y Nikora, 2000)
- Método del corte progresivo de los límites inferior y superior en función de estadísticos 5% y 95%, PCLU (Castillo, 2008).
- Método del umbral espacio-estado PSTM (Goring y Nikora, 2002).
- Método del umbral espacio-estado PSTM+W (programa WinADV por Whal, 2003).
- Método del umbral espacio-estado PSTM+C (Castillo, 2009).

Método del umbral de aceleración y velocidad, ATM+C (Castillo, 2009). Particularidades del resalto hidráulico.

UMBRAL DE VELOCIDAD:

El Criterio de Chauvenet:

El dato se descarta basándose en cuánto difiere el valor dudoso de la media.

- Si $Pr < 1/2n \rightarrow$ se descarta.

UMBRAL DE ACELERACIÓN:

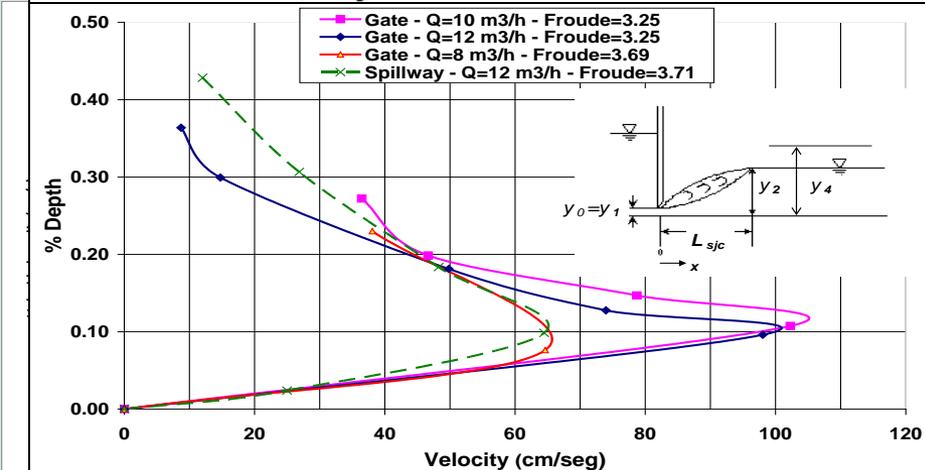
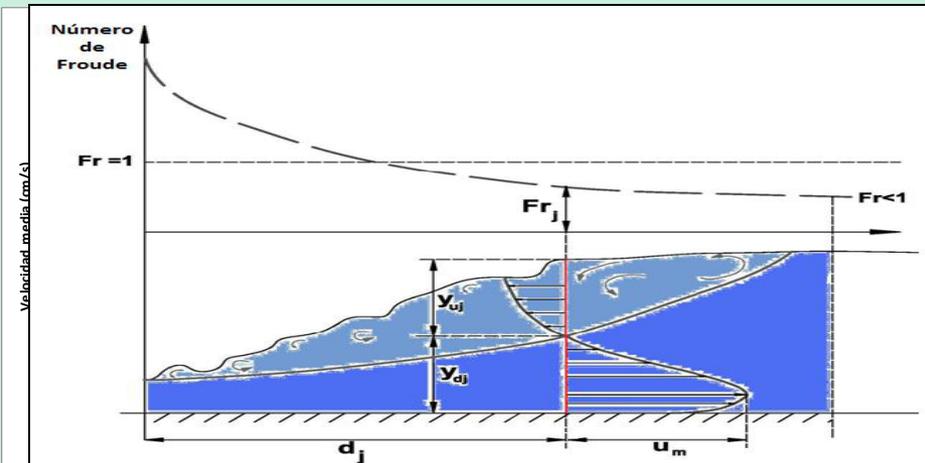
En el caso de resaltos hidráulicos debe particularizarse:

- Se calcula en función de la velocidad máxima obtenida (u_m) en la sección/posición estudiada.

- Se obtiene una aceleración máxima que representará el umbral de filtrado: $a_{max} = u_m / \Delta t$

• Si $a_i = (u_i - u_{i-1}) / \Delta t > a_{max} \rightarrow$ el dato se descarta.

El reemplazo se hace por los 12 puntos que engloban al eliminado en ambos casos.



Método del umbral espacio-estado PSTM (Goring y Nikora, 2002) y PSTM+C (Castillo, 2009).

Usa el concepto del mapa de representación tridimensional de Poincaré o representación Espacio- Estado.

Se definen como **spikes** aquellos puntos que se sitúan fuera de la **elipse** correspondiente.

Las ecuaciones de cálculo de los ejes a y b del plano $\Delta^2 u_i = f(u_i)$ son:

-Goring y Nikora (2002):

$$\begin{aligned} (\lambda_U \sigma_U)^2 &= a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta \\ (\lambda_U \sigma_{\Delta^2 u})^2 &= a^2 \sin^2 \theta + b^2 \cos^2 \theta \end{aligned}$$

-Castillo (2009):

$$\begin{aligned} (\lambda_U \sigma_U)^2 &= a^2 \cos^2(\theta/2) + b^2 (\lambda_U \sigma_u / \lambda_U \sigma_{\Delta^2 u}) \sin^2(\theta/2) \\ (\lambda_U \sigma_{\Delta^2 u})^2 &= a^2 (\lambda_U \sigma_{\Delta^2 u} / \lambda_U \sigma_u) \sin^2(\theta/2) + b^2 \cos^2(\theta/2) \end{aligned}$$

sistema de ecuaciones que cumple, en cualquier situación, la identidad trigonométrica.

Las ecuaciones del ángulo de rotación del eje son:

-La cross-correlación propuesta por Goring y Nikora (2002):

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\sum u_i \Delta^2 u_i}{\sum u_i^2} \right)$$

-Ajuste de Gauss propuesto por Castillo (2009):

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{(n \sum u_i \Delta^2 u_i - \sum u_i \sum \Delta^2 u_i) / (n \sum u_i^2 - (\sum u_i)^2)}{\dots} \right]$$

El reemplazo se hace por la media de los 12 puntos que engloban al eliminado.

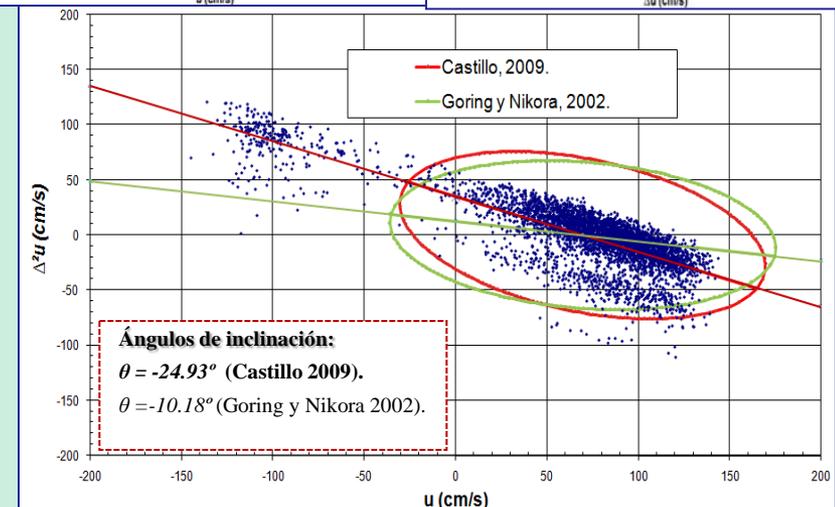
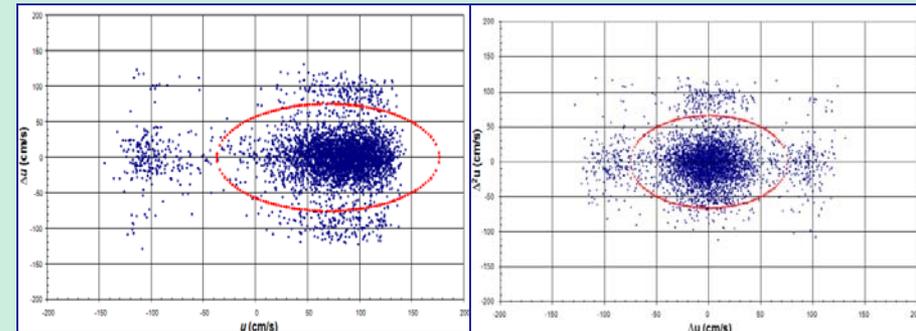
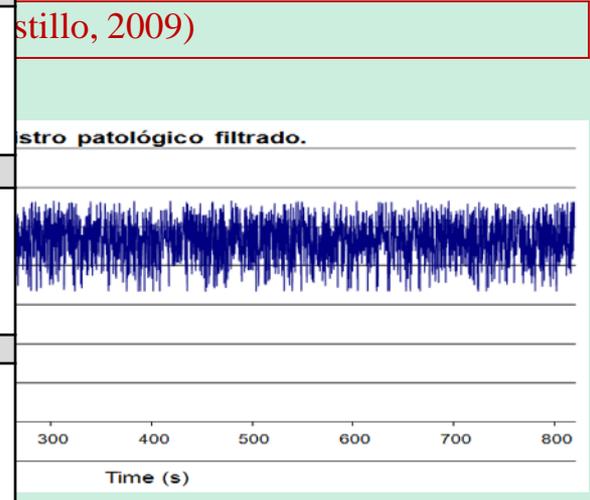
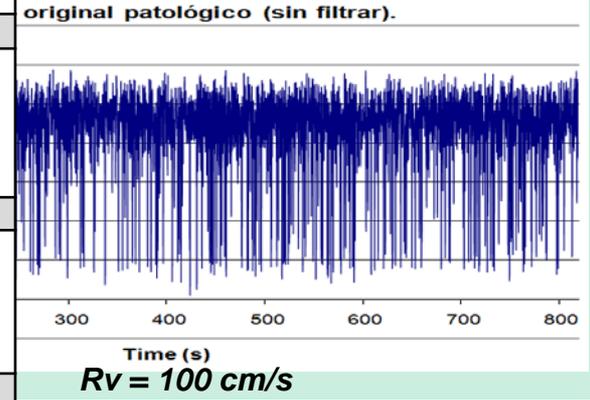
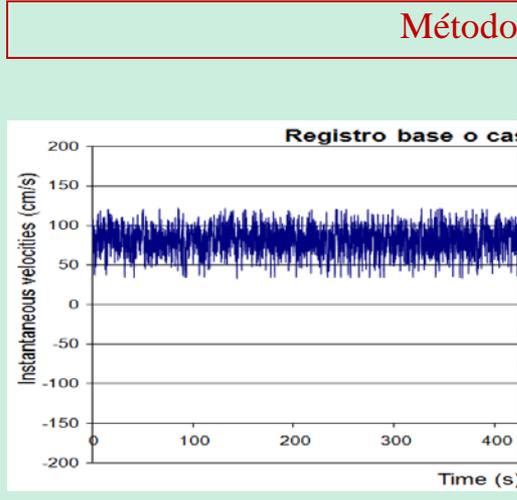
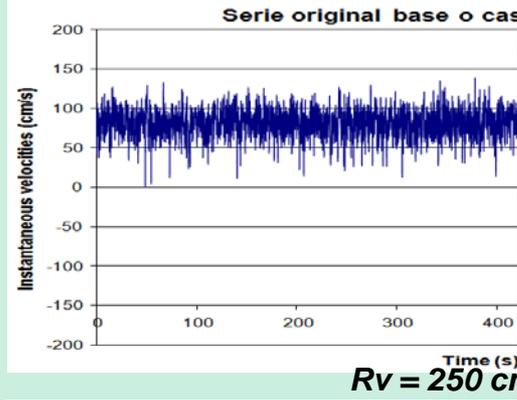


TABLA COMPARATIVA DE RESULTADOS

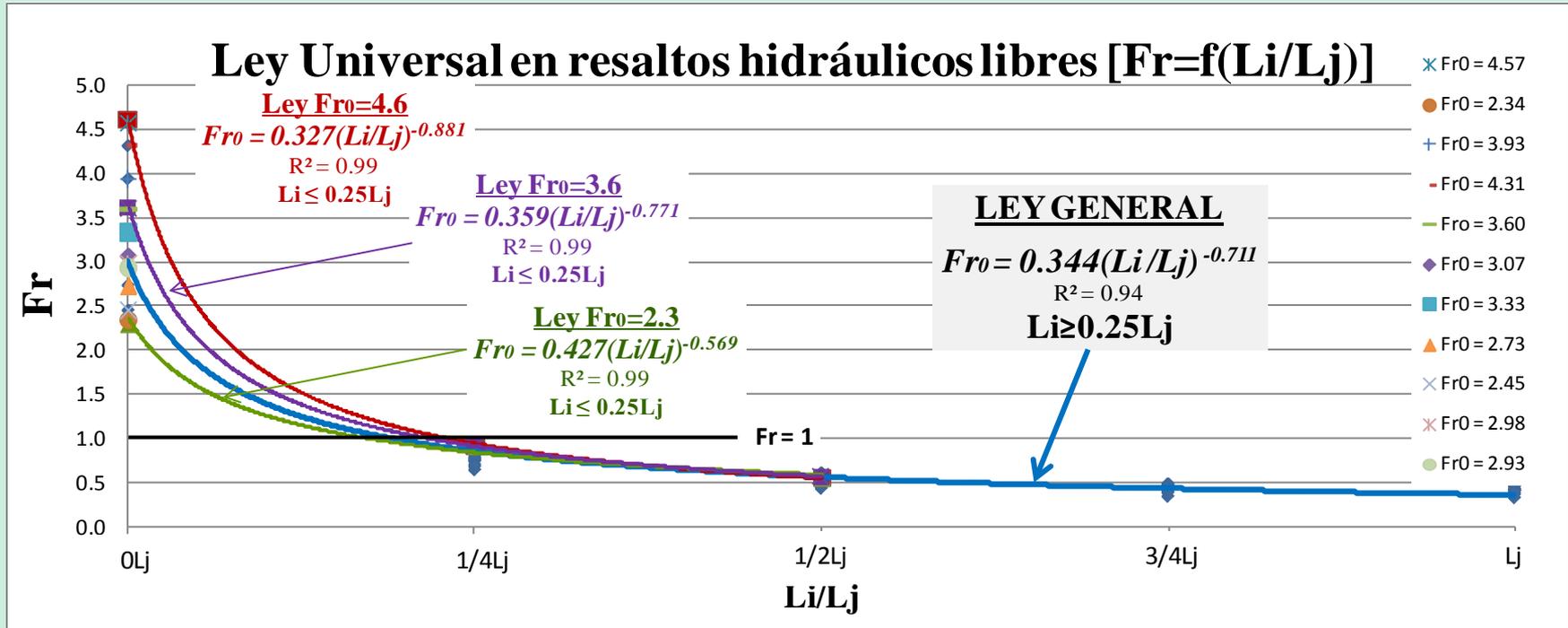
<u>Registro original</u>	<u>R. base</u>	<u>R. patológico</u>
Longitud de la serie de datos:	4096	4096
Intervalo temporal de muestreo (s):	0.20	0.20
Media tras filtrado (cm/s):	81.60	69.56
Desviación estándar tras filtrado (cm/s):	18.75	52.38
Métodos ATM+C (2009)		
Iteraciones:	0	0
Número de spikes:	101	768
Media tras filtrado (cm/s):	81.76	81.83
Desviación estándar tras filtrado (cm/s):	18.04	24.50
PLCU (Castillo 2008)		
Iteraciones:	2	2
Número de spikes:	175	1439
Media tras filtrado (cm/s):	81.75	78.51
Desviación estándar tras filtrado (cm/s):	18.20	28.75
Método PSTM		
Iteraciones:	0	1
Número de spikes:	771	1574
Media tras filtrado (cm/s):	77.48	70.90
Desviación estándar tras filtrado (cm/s):	17.81	24.21
Método PSTM+W (Programa WinADV por Wahl, 2003)		
Iteraciones (sin reemplazo):	0	0
Número de spikes:	41	581
Media tras filtrado (cm/s):	81.81	80.91
Desviación estándar tras filtrado (cm/s):	18.28	29.84
Método PSTM+C (Castillo, 2009)		
Iteraciones:	0	0
Número de spikes:	679	734
Media tras filtrado (cm/s):	78.13	75.55
Desviación estándar tras filtrado (cm/s):	17.67	29.27



Método

Castillo, 2009)

registro patológico filtrado.



Ley Universal que relaciona el Número de Froude en función de la posición en un resalto hidráulico.

- Para $Li > 0.25Lj$, los datos colapsan observándose un buen ajuste de la ley general.
- Se observa que el flujo cambia a subcrítico ya en el primer cuarto del resalto hidráulico.

Conclusiones

- En flujos altamente turbulentos y aireados, el rango de velocidad recomendado por el fabricante del equipo ADV no es el idóneo.
- El método ATM+C constituye el procedimiento más adecuado y robusto para la detección y reemplazo de spikes en el caso de resaltos hidráulicos.
- Frente a un equipo láser, la sonda ADV junto con una correcta aplicación de las técnicas de filtrado de datos, certifica una solución técnica y económica viable.
- La ley de variación del Número de Froude dentro de resaltos hidráulicos constituye una ley universal a partir del primer cuarto de la longitud del resalto hidráulico.