



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
DE CARTAGENA**
ESCUELA UNIVERSITARIA DE
INGENIERÍA TÉCNICA CIVIL



***INGENIERÍA TÉCNICA DE OBRAS PÚBLICAS
ESPECIALIDAD EN HIDROLOGÍA***

Proyecto Fin de Carrera

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE VELOCIDADES Y
ENERGÍA CINÉTICA, AGUAS ABAJO DEL IMPACTO DE
UN CHORRO DE VERTIDO LIBRE EN UN CUENCO DE
AMORTIGUACIÓN.**

ALEXANDRA VACACELA PROCEL

Dirigido por:
D. LUIS G. CASTILLO ELSITDIÉ
Doctor Ingeniero de Caminos, C. y P.

Cartagena, Diciembre de 2012.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.	1
I. OBJETIVOS.	1
II. RESUMEN.	2
II.1. Campaña de mediciones.	2
II.2. Análisis de datos.	3
III. INFRAESTRUCTURA E INSTRUMENTACIÓN.	6
III.1. Infraestructura.	6
III.2. Funcionamiento de la sonda ADV.	10
III.2.1. Componentes principales de la sonda ADV.	11
III.2.1.1. Geometría de los brazos.	12
III.2.1.2. Definición del volúmen de muestreo.	13
III.2.1.3. Registro.	14
III.2.1.4. Rango de velocidad.	14
III.2.1.5. Muestreo.	15
III.2.1.6. Intensidad de señal.	15
III.2.1.7. Correlación.	15
III.3. Descripción del equipo informático.	16
III.3.1. Programa de adquisición de datos en tiempo real.	16
III.3.1.1. Configuración.	17
III.3.2. Programa de post procesado de datos (Explore V).	18
III.3.2.1. Opciones del programa.	19
IV. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL FLUJO EN ALVIADEROS DE VERTIDO LIBRE POR CORONACIÓN.	20
IV.1. Introducción.	20
IV.2. Análisis de la disipación de energía en el vertido libre.	23
IV.3. Fases vuelo del chorro a través de la atmosfera.	23
IV.3.1. Longitud de rotura y espesor del chorro para el caso de flujo en napa.	25
IV.4. Comportamiento del flujo dentro del cuenco.	28
IV.5. Conceptos básicos del resalto hidráulico.	32
IV.5.1. Introducción.	32
IV.5.2. Resalto hidráulico sumergido.	34
IV.5.2.1. Longitud del resalto sumergido.	35
IV.5.2.2. Altura relativa del resalto.	36
IV.5.2.3. Perdida de energía y eficiencia.	36

IV.5.3. Circulación del flujo en el cuenco en función del calado aguas abajo	37
IV.5.4. Desarrollo del flujo del chorro en el interior del cuenco.	34
IV.5.5. Circulación del flujo en el cuenco en función del calado aguas abajo.	36
V. FILTRADO DE DATOS.	38
V.1. Problemática de la sonda (Doppler ADV).	38
V.2. Pasos del filtrado de datos.	40
V.3. Métodos de filtrado de datos.	41
V.3.1. Método del umbral de aceleración y velocidad, ATM (Goring y Nikora, 2000)	41
V.3.2. Método ATM+C	42
V.3.3. Método del umbral de correlación.	43
V.4. DESARROLLO Y APLICACIÓN.	44
V.4.1. Filtrado de la serie con turbulencia alta.	45
V.4.2. Filtrado de la serie con turbulencia media.	51
V.4.3. Filtrado de la serie con turbulencia baja.	56
V.5. CONCLUSIÓN FILTRADO.	61
VI. CAMPAÑA DE MUESTREO.	62
VI.1. ANÁLISIS RESULTADOS GRAFICOS.	65
VI.1.1. CAUDAL 19.58 l/s	66
VI.1.2. CAUDAL 30.67 l/s	98
VI.1.3. CAUDAL 45.31 l/s	130
VII. CONCLUSIONES.	163
ANEXO I: Resultados de los datos tras su filtrado para la campaña de muestreo.	165
ANEXO II: Colección fotográfica.	204
BIBLIOGRAFIA.	208

INTRODUCCIÓN.

En los aliviaderos de vertido libre el agua se evacúa mediante un chorro aireado y turbulento, cuya energía cinética debe ser amortiguada antes de su restitución al cauce natural. Dentro del cuenco de amortiguación, los remolinos turbulentos que se generan contribuyen a la disipación de la energía del chorro.

En este Proyecto Fin de Carrera se lleva a cabo la caracterización de velocidades y energía cinética en el seno de resaltos hidráulicos sumergidos generados en el cuenco de amortiguación de un aliviadero de vertido libre por coronación.

En la fase inicial del laboratorio, mediante un equipo de metodología Doppler, se registran las velocidades medias y turbulentas aguas abajo del punto de impacto del chorro con el colchón de agua. Posteriormente se realiza el análisis de los datos obtenidos.

El proyecto que se aborda es de tipo teórico – experimental, aplicando y poniendo en práctica los conocimientos adquiridos en las asignaturas de Obras y Aprovechamientos Hidráulicos.

I. OBJETIVOS.

Los objetivos marcados son:

- ✓ Familiarizarse y realizar un buen manejo de la instrumentación a emplear (Acoustic Doppler Velocimeter, ADV), así como la infraestructura en que se realizará el estudio (aliviadero de vertido libre por coronación).
- ✓ Adquisición de velocidades instantáneas en un flujo en lámina libre con ayuda del equipo Doppler. El cuenco de disipación se divide en siete secciones situadas aguas abajo de la posición del chorro incidente colchón de agua.
- ✓ Análisis y tratamiento de los datos registrados usando métodos estadísticos de filtrado de datos.

- ✓ Estudio, contraste y conclusiones de las distribuciones de velocidades e índices turbulentos obtenidos en el seno de resaltos hidráulicos sumergidos.

II. RESUMEN.

II.1. Campaña de mediciones.

Esta fase consiste en la medición de velocidades instantáneas en el cuenco de disipación. Se emplean diferentes caudales con distintos colchones de agua a fin de detectar el área de influencia del chorro en los datos registrados. En cada medición se registran 5000 muestras a una frecuencia de 10 Hz.

La campaña de mediciones es la siguiente:

Caudal	Localización de Perfiles	Nº de colchones de agua
Inferior 19.58 l/s	De X= 10 a X = 60 cm	6
Medio 30.67 l/s	De X= 10 a X = 70 cm	6
Superior 45.31 l/s	De X= 10 a X = 70 cm	6

Tabla 1: Rango de caudales y secciones a medir con equipo Doppler.

Las secciones de estudio se localizan a distintas distancias aguas abajo del punto de estancamiento del chorro (figura II.1).

0cm 10cm 20cm 30cm 40cm 50cm 60cm 70cm



Figura II.1: Distribución de secciones de estudio en el cuenco de amortiguación.

II.2. Análisis de datos.

En esta fase se realiza la evaluación y validación de los datos registrados por el equipo Doppler mediante un software informático (Collector V).

Es importante seguir un criterio objetivo en la interpretación de las series y en la aplicación de métodos de filtrado de datos a fin de eliminar los datos anómalos o “spikes” obtenidos durante la medición.

A continuación se muestran los resultados del método de filtrado obtenido para un punto con alta influencia. Se realiza un estudio más de tallado del método de filtrado en función de la turbulencia de la serie original, en el apartado VI.1.

	Desviación estándar del registro	% Datos originales
Serie original	$\sigma = 56.25$	100
Serie filtrada k=2.5	$\sigma = 43.99$	95.9

Tabla 2: Elección de Filtrado para serie de turbulencia baja.

En la Figura II.2 se muestran los resultados del método de filtrado umbral de velocidad aplicado a un punto obtenido con $Q=30.67$ l/s situado a una altura de $y=3.4$ cm, perteneciente a la sección $x=60$ cm:

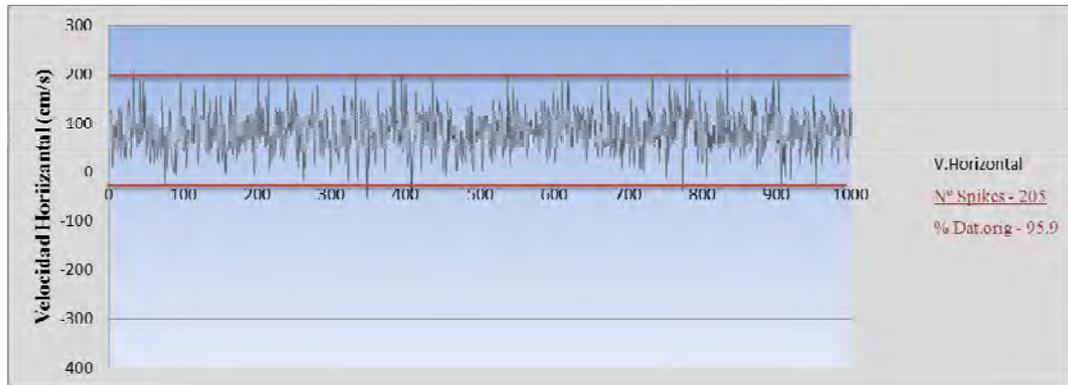


Figura II.2: Ejemplo serie de datos filtrada con $k=2.5$ para serie con baja turbulencia.

En la Figura II.3 muestra la distribución de velocidades obtenidas en diferentes secciones para un caudal de 30.67 l/s y un colchón de agua de $Y=23.5$ cm.

Vemos que los perfiles tienen una tendencia muy definida guiada por el perfil $x=10$ cm que sufre las perturbaciones producidas al inicio del resalto sumergido y el perfil más alejado de la zona de impacto. De manera que se alcanza un máximo de 0.83 m/s.

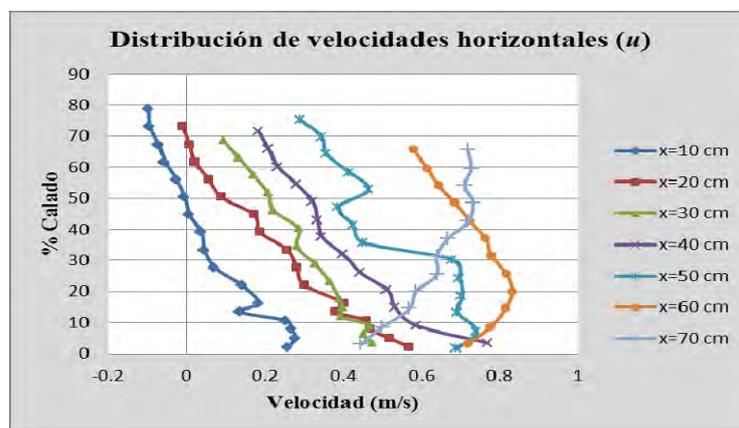


Figura II.3: Distribución de velocidades medias horizontales dentro del colchón de agua para $Q=30.67$ l/s; $Y=23.5$ cm.

En la Figura II.4 se especifica la intensidad de turbulencia para las distintas secciones de estudio dentro del cuenco de amortiguación.

La tendencia de los perfiles más cercanos a la zona de impacto siguen una distribución uniforme debido a que la variación entre la velocidad turbulenta horizontal y vertical es

mínima. El segundo grupo formado por los últimos perfiles se direcciona hacia la superficie con valores en torno a 0.2 y 0.4.

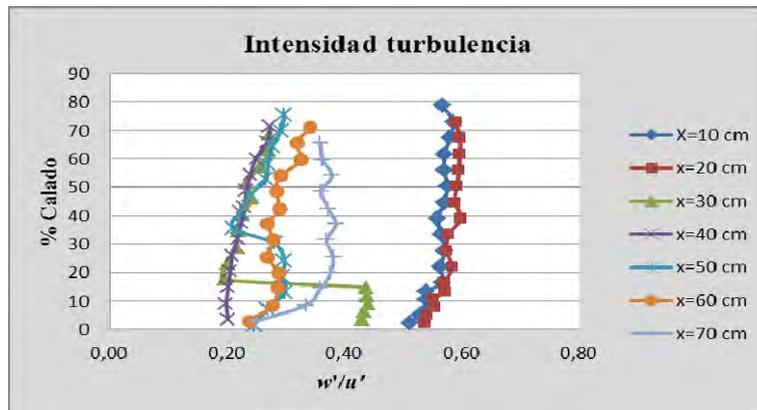


Figura II.4: Relación entre la velocidad turbulenta vertical y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=30.67$ l/s; $Y=23.5$ cm.

La Figura II.5 muestra la evolución de la energía cinética turbulenta a lo largo del cuenco de amortiguación.

En las secciones 10 y 20 la energía cinética turbulenta permanece con valores casi nulos debido a la cantidad de burbujas en estas zonas. Se observa que la tendencia de los perfiles medios es muy parecida al desarrollarse una mayor intensidad energética de $0.96 \text{ m}^2/\text{s}^2$ a causa de que el chorro de fondo es más acusado en esta zona por el empuje del fluido. Posteriormente en los perfiles alejados de la zona de impacto la disipación de energía se va produciendo por la disminución de turbulencia.

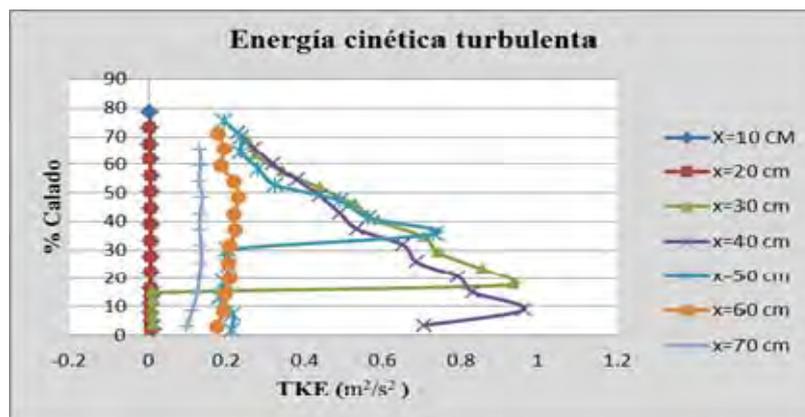


Figura II.5: Perfiles de energía cinética turbulenta en el cuenco, para $Q=30.67$ l/s; $Y=23.5$ cm.

III. INFRAESTRUCTURA E INSTRUMENTACIÓN.

Este proyecto se ha ejecutado empleando:

- ✓ Infraestructura que simula un aliviadero de vertido libre por coronación ubicada en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena.
- ✓ Equipo Doppler para la medición de velocidades instantáneas en el flujo bifásico generado en el cuenco de amortiguación.
- ✓ Equipo informático para el tratamiento y análisis de los datos.

A continuación se comentan estos puntos.

III.1. Infraestructura.

La Figura III.1 muestra los principales elementos que forman parte de la infraestructura de un aliviadero de vertido libre en el que se ha efectuado la campaña de laboratorio:

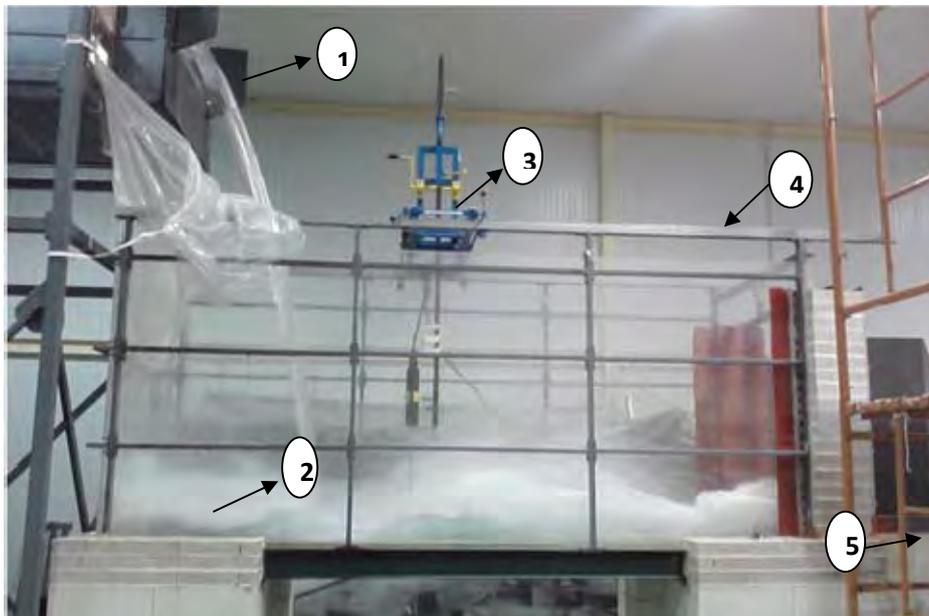


Figura III.1. Elementos de la infraestructura.

Las distintas partes son:

1. Cajón con aliviadero de pared delgada.
2. Cuenco de amortiguación de metacrilato (1.14x2.92x1.33m).

3. Mecanismo móvil de posicionamiento de la sonda Doppler.
4. Carril de desplazamiento del mecanismo móvil.
5. Canal de desagüe y aforo.

A continuación se describen cada uno de los principales elementos del modelo:

- ✓ Conducciones en presión: Fabricadas en PVC, su función es la de conectar la cantara de bombeo con el cajón superior (aliviadero) generando un circuito cerrado. Tiene acoplada una válvula de mariposa que actúa como regulador para ajustar el caudal deseado (Fig. III.2).



Figura III.2: (a) Conducciones en presión; (b) Detalle de la válvula de mariposa.

- ✓ Cajón superior: Construido con madera y acero, está provisto de elementos tranquilizadores (las rejillas perforadas y un muro de grava aluvial), cuyo objetivo es tranquilizar el flujo aguas arriba del aliviadero de pared delgada (Figura III.3).



Figura III.3: Detalle del cajón superior que constituye el vertedero de labio fijo.

- ✓ Cuenco de amortiguación: Diseñado en metacrilato, su fin es el de amortiguar el impacto del chorro. Permite observar y estudiar claramente los fenómenos producidos por el vertido de distintos caudales (Figura III.4) sobre distintos colchones de agua.



Figura III.4: Detalle de cuenco amortiguación.

El cajón ha sido construido de manera que se puedan modificar el calado del colchón de agua a través de barreras metálicas colocadas a la salida del cuenco. De esta forma, se crea una contrapresa que genera el colchón de agua deseado (Figura III.5).



Figura III.5: Detalle de barreras que conforman la contrapresa.

- ✓ Mecanismo móvil de posicionamiento de la sonda Doppler: Soporte de acero donde se instala la sonda Doppler. Permite posicionar de forma transversal, horizontal o vertical, posibilitando colocar la sonda en la zona de estudio deseada (Figura III.6)



Figura III.6: Mecanismo de sujeción de la Sonda Doppler.

- ✓ Aforador, se dispone de un vertedero triangular de pared delgada aguas abajo de un canal con elementos tranquilizadores del flujo. Es una de las estructuras más precisas para la medición del caudal circulante en el canal mediante la lectura de un limnómetro situado aguas arriba del vertedero triangular. Se caracterizan porque la forma de la ventana creada para el vertido del flujo es triangular. Este tipo de vertedero también es conocido como vertedero Thomson (Figura III.7).

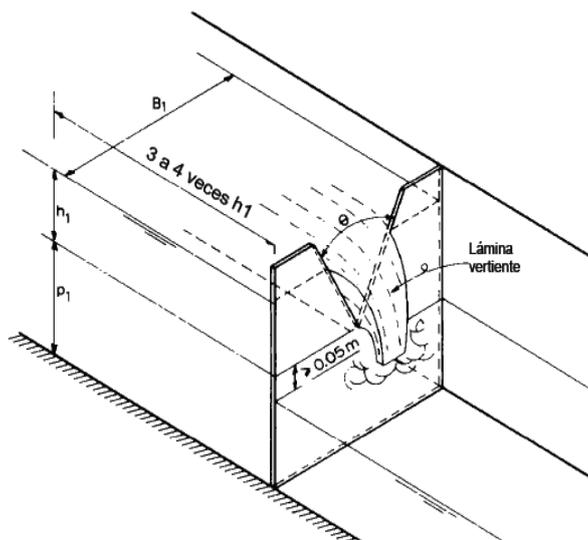


Figura III.7: Vertedero triangular de pared delgada.

- ✓ Cuadro eléctrico: Recoge los controles para la puesta en marcha y parada de las bombas de impulsión situadas en la cantara de bombeo (Figura III.8).



Figura III.8: Caja eléctrica que regula las bombas.

III.2. Funcionamiento de la sonda ADV.

Los equipos ADV miden la velocidad del agua usando un principio físico llamado efecto de Doppler- Fizeu. Si una fuente de sonido está en movimiento relativo respecto al receptor, la frecuencia del sonido en el receptor es transformada en función de la frecuencia de transmisión mediante:

$$F_{Doppler} = -F_{Fuente} (V/C) \quad (3.1)$$

Dónde:

$F_{Doppler}$ = cambio en la frecuencia recibida (transformación Doppler)

F_{Fuente} = frecuencia de transmisión del sonido

V = velocidad de la fuente relativa al receptor

C = velocidad del sonido

La velocidad V representa la velocidad relativa entre fuente y receptor (por ejemplo, el movimiento que modifica la distancia entre los dos). El movimiento perpendicular a la línea que conecta la fuente y el receptor no introduce un cambio de frecuencia. Si la distancia entre los dos objetos está disminuyendo, la frecuencia crece; si la distancia está aumentando, la frecuencia disminuye.

La onda se mueve a la velocidad de las partículas, midiéndose así directamente el movimiento de éstas, que se considera igual a la velocidad del fluido debido a que sólo experimentan un retardo inercial despreciable respecto a la velocidad real del fluido. Los receptores rodean al emisor midiendo cada uno una proyección del vector velocidad, gracias al eco detectado (Figura III.9).



Figura III.9: (a) Partes de la sonda ADV. (b) Detalle del sensor acústico (Molina Miñano, 2010).

Se llama frecuencia Doppler, al cambio de frecuencia de la onda acústica generada por el emisor e inducida por el movimiento de las pequeñas partículas, siendo $f_D = f_r - f_e$. Si se relaciona la frecuencia Doppler con las proyecciones de la velocidad u de las pequeñas partículas en la dirección de los ejes del emisor y el receptor, u_e y u_r respectivamente, la frecuencia Doppler resulta ser:

$$f_D = \frac{f_c}{c(u_e + u_r)} \quad (3.2)$$

En flujos altamente turbulentos y aireados sólo se pueden determinar sus índices con alta resolución cuando las señales son coherentes pulso a pulso; sin embargo en estos casos, la señal suele captar ruidos y señales parásitas *Blanckaert y Lemín (2006), citado por Molina Miñano (2010)*.

III.2.1. Componentes principales de la sonda ADV.

En la Figura III.10 y Figura III.11 se pueden ver las diferentes partes de las que está compuesta la sonda Doppler así como los elementos accesorios.

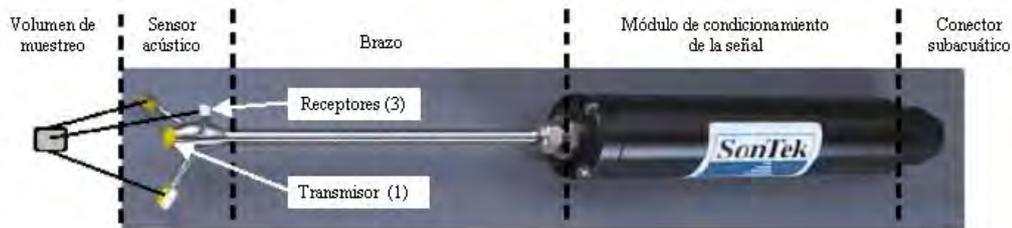


Figura III.10: Partes principales de la sonda Doppler (Carrillo, 2004).

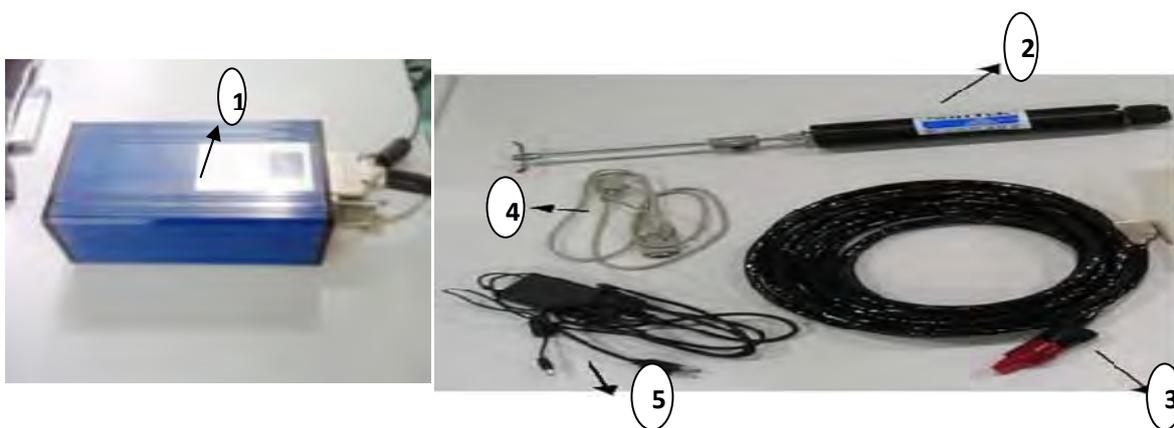


Figura III.11: Elementos de la sonda Doppler.

Donde III.11:

1. Dispositivo de procesamiento de la señal ADV a prueba de salpicaduras.
2. Sonda 3D de 16 MHz con emisor y receptores orientados hacia abajo.
3. Cable de unión entre la sonda y el módulo de procesamiento.
4. Cable que conecta el dispositivo de procesamiento con el ordenador.
5. Cable de alimentación del dispositivo de procesamiento.

III.2.1.1. Geometría de los brazos.

Mediante relaciones sencillas de la relación transmisor/receptor, el equipo proyecta la velocidad del agua en su eje biestático. El ADV usa un transmisor y de dos a cuatro receptores acústicos (para sondas 2D, 3D ó Vectrino). Los receptores están alineados para intersectarse con el brazo transmisor en un mismo volumen de muestreo.

De este modo, conociendo la orientación relativa de los tres ejes biestático, combina las medidas de velocidad de cada receptor para calcular las componentes de la velocidad del agua en el volumen de muestreo.

La Figura III.12 muestra la geometría de una sonda ADV 2D. Los ejes de cada receptor están inclinados 30° respecto al transmisor. El eje biestático de cada receptor está entre los ejes transmisor y receptor (inclinado 15° respecto al eje del transmisor). Los receptores están enfocados, hacia un volumen localizado a 5 o 10 cm debajo del transmisor (la distancia varía en función de la configuración de la sonda).

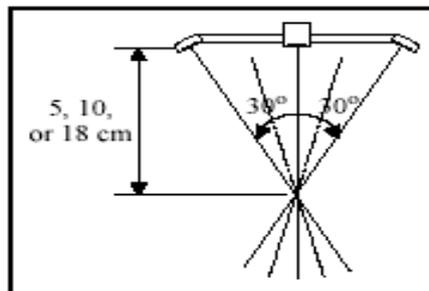


Figura III.12: Geometría de la sonda de ADV 2D (Carrillo, 2004).

III.2.1.2. Definición del volumen de muestreo.

El tamaño del volumen de muestreo está determinado por cuatro factores: la zona de muestreo del brazo transmisor, la zona de muestreo del brazo receptor, la duración del pulso, y la ventana del receptor (período de tiempo sobre el que la señal reflejada es muestreada). La Figura III.13 muestra el efecto de cada uno de estos factores.

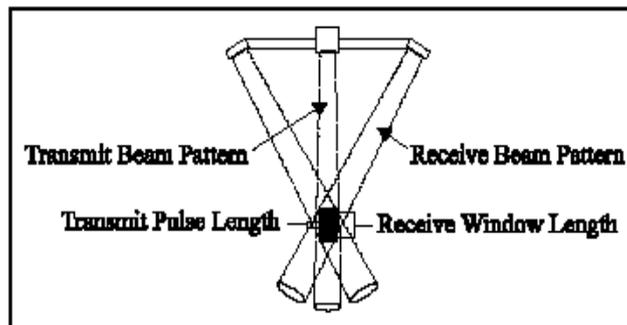


Figura III.13: Definición del volumen de muestreo (Carrillo, 2004).

El volumen de muestreo no tiene límites horizontales bien definidos. Estos límites son determinados por la intersección de la zona de muestreo de los brazos transmisor y receptor, por lo que los objetos cercanos a esos límites pueden interferir potencialmente en las medidas de velocidad. A efectos prácticos se puede aproximar a un cilindro del tamaño del transmisor cerámico.

El volumen de muestreo para la sonda Nortek 10 MHz ADV empleada tiene un diámetro de 6 mm y su altura se puede seleccionar entre 3 y 15mm.

III.2.1.3. Registro.

El equipo registra, tres valores de velocidad (uno para cada componente) con cada muestra de datos de ADV, valores de intensidad de señal de ruido (uno para cada receptor), y valores de correlación (uno para cada receptor). Generalmente, los datos de velocidad son los que presentan mayor interés. La intensidad de señal y la correlación se pueden usar para revisar la calidad de los datos y para detectar datos potencialmente erróneos.

III.2.1.4. Rango de velocidad.

Uno de los parámetros más importantes del ADV es la configuración del rango de velocidad que determina la velocidad máxima que puede ser medida por el instrumento. Las configuraciones del rango de velocidad estándares para la sonda de 10 MHz ADV son ± 3 , ± 10 , ± 30 , ± 100 , ± 250 y 400 cm/s. Por lo general, se debe escoger la configuración del rango de velocidad más baja que cubra la velocidad máxima esperada en un ensayo dado. El ruido generado por el instrumento en los datos de velocidad es proporcional a la configuración de rango de velocidad. De este modo, altos rangos de velocidad tienen niveles de ruido más elevados.

La configuración del rango de velocidad en un valor nominal. La máxima velocidad real depende de la dirección del flujo respecto la sonda. El ADV mide velocidades a lo largo del eje de biestático de cada receptor, por lo que las limitaciones de velocidad máximas se producen en las velocidades en el eje biestático. Puesto que los ejes biestático tienen una inclinación de 15° respecto al eje vertical de la sonda, el ADV es más sensible al flujo vertical, presentando una velocidad máxima inferior para flujos verticales. La tabla siguiente muestra las velocidades máximas que pueden medirse en cada rango de velocidad del ADV para flujos verticales u horizontales.

Rango de velocidad del ADV Vetrino	Máxima velocidad horizontal	Máxima velocidad vertical
± 3 cm/s	± 26 cm/s	± 8 cm/s
± 10 cm/s	± 44 cm/s	± 13 cm/s
± 30 cm/s	± 94 cm/s	± 27 cm/s
± 100 cm/s	± 188 cm/s	± 54 cm/s
± 250 cm/s	± 328 cm/s	± 94 cm/s
± 400 cm/s	± 525 cm/s	± 150 cm/s

Tabla 3: Rango de velocidades del equipo Doppler Vetrino.

Al operar en flujos altamente turbulentos el ADV puede mostrar valores de correlación bajos que generan un aumento del ruido en las medidas de velocidad. El nivel de ruido puede reducirse aumentando el rango de velocidad.

III.2.1.5. Muestreo.

El ADV está diseñado para medir la velocidad tan rápidamente como sea posible. Una estimación instantánea del campo de velocidad 3D se denomina sonido de impacto. El ADV registra 150-250 veces por segundo el sonido de impacto (la proporción varía con la configuración del rango de velocidad). Como el ruido de impacto instantáneo es demasiado alto para su uso práctico, el ADV promedia varios sonidos de impacto para obtener el nivel de ruido en cada muestra de velocidad de salida. El número de sonidos de impacto promediados es configurado al especificar el rango de muestreo.

Un resultado importante del esquema de muestreo del ADV es que reduciendo el rango de muestreo disminuye el ruido en cada muestra (aumentando el número de sonidos de impacto promediados por muestra). El ruido generado por el instrumento, también denominado como ruido Doppler, es casual. Promediando múltiples puntos convergirá hacia el valor real reduciendo este ruido. El nivel de ruido disminuye con la raíz cuadrada del número de muestras promediadas.

III.2.1.6. Intensidad de señal.

La intensidad de la señal registrada para cada receptor ADV es una medida de la intensidad de la señal acústica reflejada. La SNR se obtiene de la amplitud de la señal eliminando el nivel de ruido ambiente y convirtiéndolo a unidades de dB.

La función principal de los datos de intensidad de señal es verificar la existencia de partículas materiales suficientes en el agua. Si el agua está demasiado clara, la señal retornada puede no ser más fuerte que el nivel de ruido ambiente de la electrónica. Sin intensidad de señal suficiente, el ADV no puede realizar medidas de velocidad exactas. Cuando la SNR disminuye, el ruido en las medidas de velocidad de ADV crece. Para medidas de alta resolución (por ejemplo, muestreos a 25Hz), se recomienda mantener el SNR al menos a 15 dB.

III.2.1.7. Correlación.

El coeficiente de correlación de ADV es un parámetro de la calidad de los datos de salida obtenido directamente de los cálculos de velocidad Doppler. El ADV calcula tres valores de correlación, uno para cada receptor acústico, con cada muestra de velocidad. La correlación se expresa como un porcentaje: la correlación perfecta indica una fiabilidad del 100% en mediciones de velocidad con bajo ruido; la correlación 0% indica que el valor de la velocidad de salida está dominado por el ruido (no hay señal coherente).

III.3. Descripción del equipo informático.

Se ha empleado un ordenador para realizar la adquisición de datos y análisis de los mismos.



Figura III.14: Equipo informático.

Para evitar que las perturbaciones de la red eléctrica puedan alterar el funcionamiento del equipo Doppler, la alimentación se ha realizado mediante un sistema de alimentación ininterrumpida (SAI), el cual mejora la calidad de la energía eléctrica y filtra posibles picos de subida y bajada de tensión.

III.3.1. Programa de adquisición de datos en tiempo real.

Para la adquisición de datos, nos hemos servido del programa Collector V de Nortek:

Este programa permite realizar la calibración de la sonda ADV y la toma de datos.

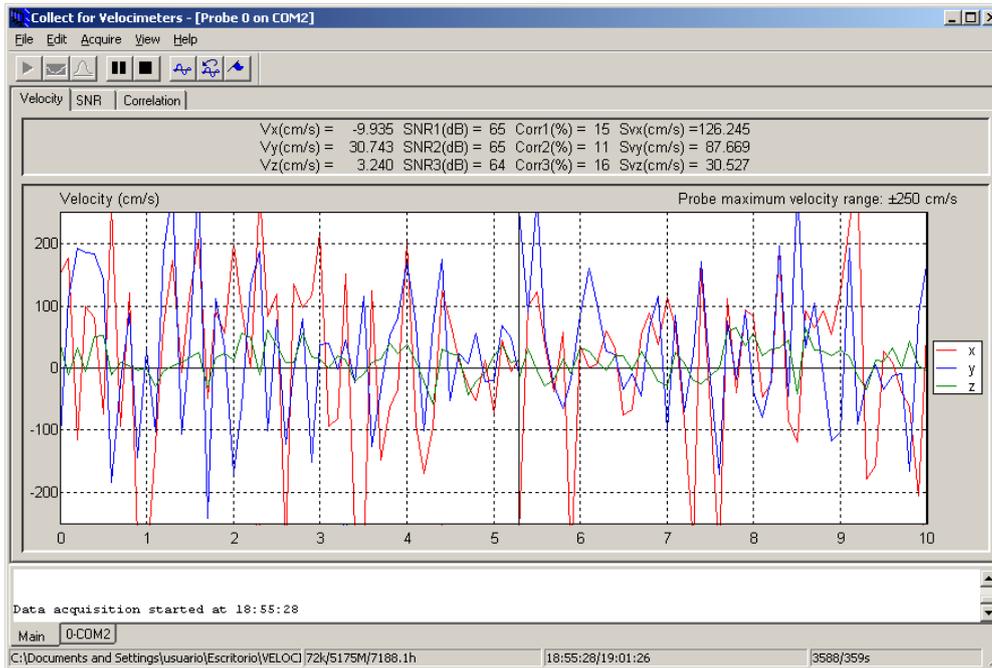


Figura III.15: Pantalla de inicio Collect for Velocimeters.

III.3.1.1. Configuración.

Una de las opciones una de las ventajas que ofrece este programa es la de poder conocer la profundidad a la que se encuentra el volumen de muestreo. La pantalla observada en la Figura III.16 b nos informa en cada instante de la distancia entre el volumen de muestreo y la pared.

Empleando la siguiente configuración (Figura III.16 a) en este estudio:

- ✓ Frecuencia de muestreo de 10 Hz.
- ✓ Rango de velocidad. Se ha elegido ± 250 cm/s, con el que se cubren todas las velocidades previsibles dentro del cuenco.
- ✓ Salinidad. Se ha tomado la salinidad de 2 ppm del agua que circula en el modelo.
- ✓ Volumen de muestreo. El volúmen de muestreo tomado es de 9 mm.
- ✓ Número de datos; En cada registro se adquieren 5000 datos.

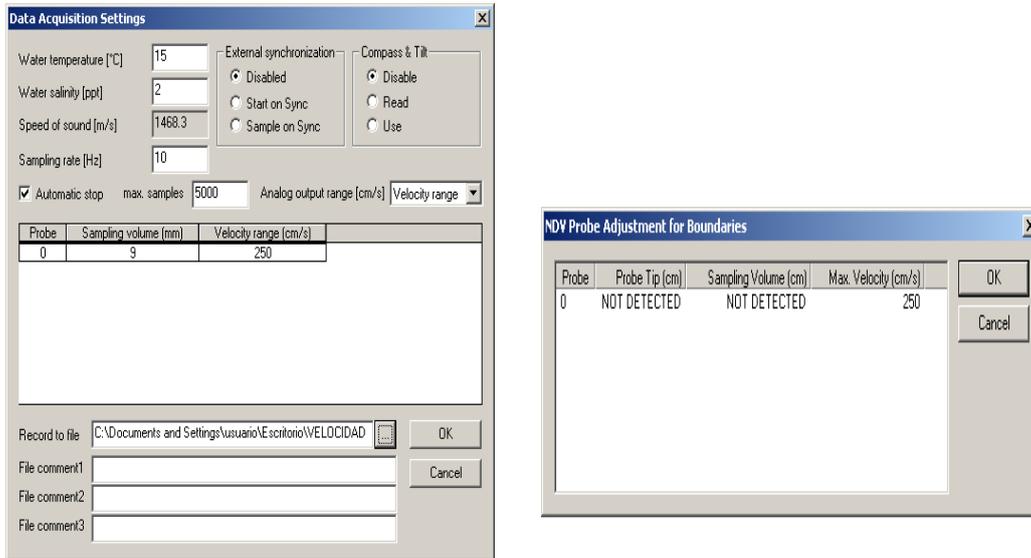


Figura III.16: (a) Pantalla de Configuración Collect for Velocimeters; (b) Pantalla informativa del volumen de muestreo y velocidad.

III.3.2. Programa de postprocesado de datos (Explore V).

Explore V es un programa de post-procesamiento de datos diseñado para visualizar, revisar y analizar la serie de datos obtenida con el equipo Acoustic Doppler Velocimeter.

En su pantalla inicial se muestran gráficas cronológicas o histogramas de los datos de velocidad registrados. La serie cronológica de correlación y de SNR, así como un resumen de los resultados estadísticos del ensayo para cada serie cronológica (velocidad media, varianza, sesgo y kurtosis para cada uno de los ejes de coordenadas), que servirán para el posible filtrado de los registros de velocidades (Figura III.17).

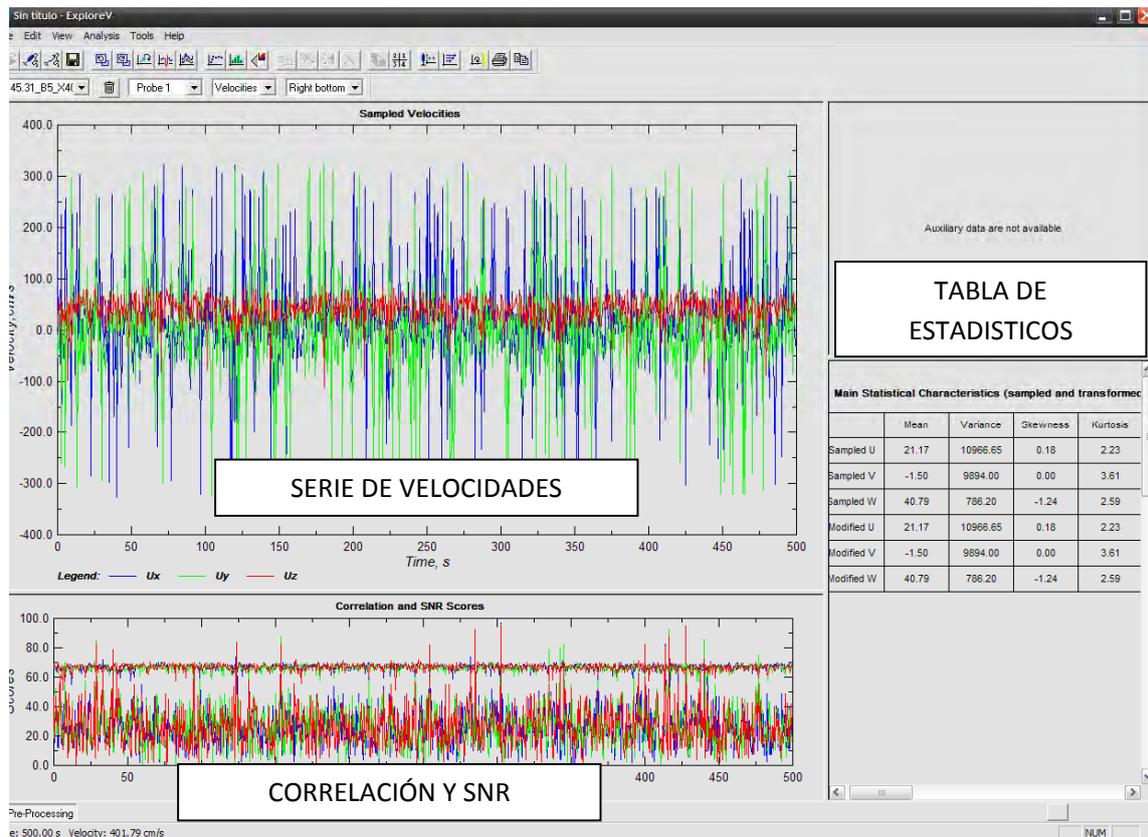


Figura III.17: Pantalla principal de Explore V.

III.3.2.1. Opciones del programa.

Las opciones que presenta la barra de herramientas del programa se clasifican en dos:

Opciones del filtrando de datos  :

Los resultados de intensidad de señal de ruido y correlación son buenos indicadores de posibles problemas que pueden aparecer al usar un ADV. Explore V Pro ofrece filtros basados en sus valores, junto a filtros basados en los umbrales de velocidad y de aceleración, pudiendo ser aplicados por separado o de forma combinada. De esta forma se pueden eliminar datos erróneos fijándonos en cómo evoluciona el registro y configurar un método de filtrado adecuado.

Opciones del procesamiento de datos :

El módulo de procesamiento de ExploreV opera en un archivo ADV completo o en una ventana de muestreo individual definida por el usuario. Los ficheros pueden ser exportados a archivos ASCII, compatibles con la mayoría de las hojas de cálculo electrónicas. Las opciones de salida incluyen histogramas, espectros de frecuencia, exportación de los datos de la serie cronológica, así como el cálculo y exportación de los resúmenes estadísticos.

IV. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL FLUJO EN ALIVIADEROS DE VERTIDO LIBRE POR CORONACIÓN.

IV.1 Introducción.

Un aspecto importante en el proyecto de una presa, es la disipación de la energía cinética del flujo que se produce cuando entran en funcionamiento sus órganos de desagüe (vertederos y disipadores de energía), los cuales tratan de restituir el agua al cauce natural en condiciones lo más parecidas a las existentes antes de la ejecución de la obra.

De este modo, limitan la erosión en el punto de restitución al cauce.

En la Figura IV.1 se presentan las principales tipologías de los disipadores de energía.

De las tipologías existentes, el vertido libre por coronación (Figura IV.1; f) constituye una forma de disipación de energía simple, cómoda y económica. El flujo cae libremente por la atmósfera desde la coronación de la presa hasta alcanzar el cuenco disipador, que se encuentra ubicado a pie de presa, donde la vena líquida se difunde, su fondo puede ser el cauce natural del río (sólo en casos de roca sana de buena calidad), o una solera de hormigón armado.

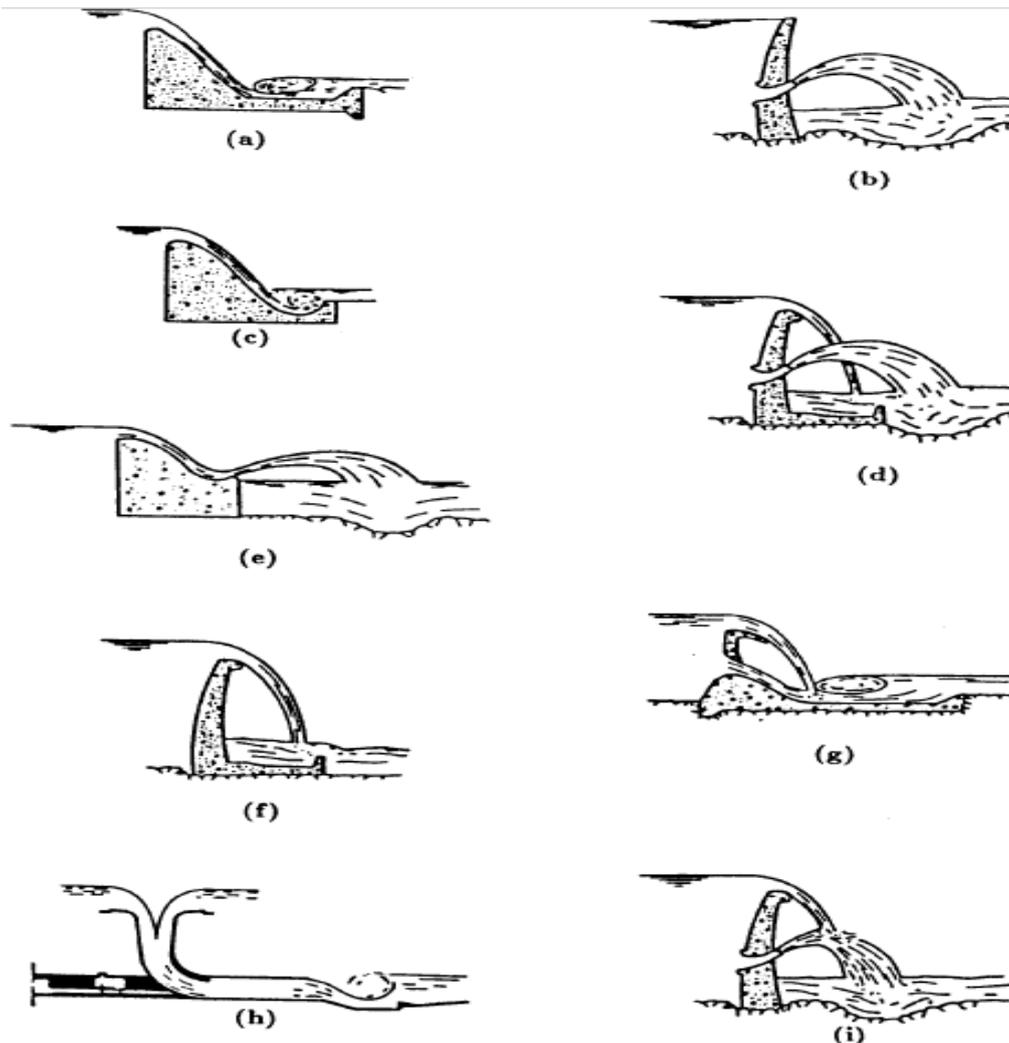


Figura IV.1: Tipología de los Disipadores de Energía Hidráulica de las Presas: (a) Por Resalto; (b) Salto de Ski de Medio Fondo; (c) Trampolín Sumergido; (d) Lámina libre y Medio Fondo; (e) Salto de Ski; (f) Lámina Libre; (g) Lámina libre y Compuerta de Fondo; (h) En Pozo con terminal en resalto; (i) Chorros Cruzados entre Lámina Libre y Medio Fondo De Lencastre (Castillo, 1989).

Dentro del cuenco se forma un resalto hidráulico sumergido, para posteriormente retomar el cauce del río a través del perfil hidrodinámico de la contrapesa (Figura IV.2).

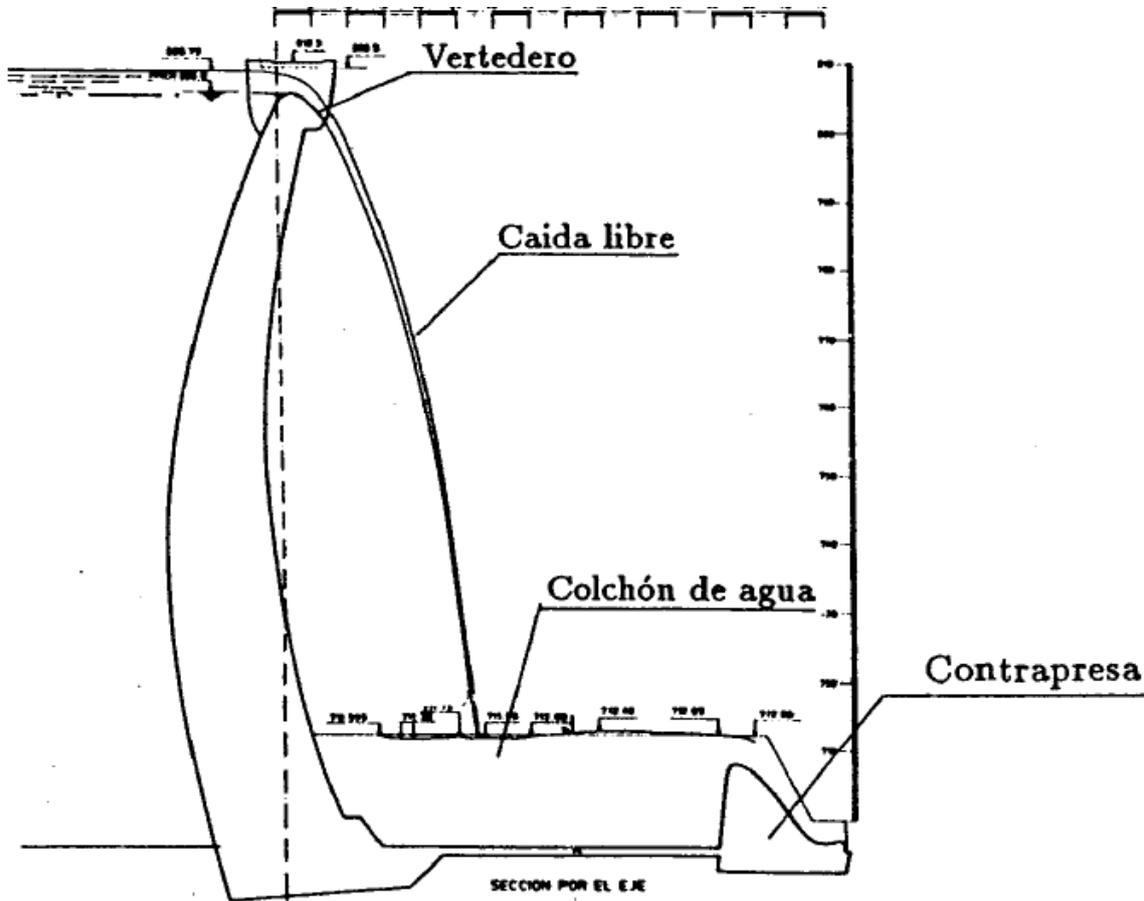


Figura IV.2: Perfil del vertedero de la presa bóveda LLosca del Cavall, con su disipador de energía al pie de la presa (Castillo, 1989).

Todos los cuencos disipadores de energía, se encuentran sometidos a una fuerte acción erosiva como consecuencia de las altas velocidades que se obtienen de la transformación de la energía potencial creada por el embalse. Además, se producen altas presiones hidrodinámicas sobre la solera del cuenco debido al efecto del impacto y deflexión del chorro turbulento.

El estudio realizado en este proyecto se limita a caracterizar las velocidades de flujo, obtenido en el laboratorio en el cuenco de disipación de un aliviadero de vertido libre.

IV.2. Análisis de la disipación de energía en el aliviadero de vertido libre.

El objetivo de las estructuras de disipación es disminuir la energía cinética excedente en un flujo, mediante procesos de aireación y turbulencia.

En un aliviadero de vertido libre el proceso de disipación se logra de dos maneras conjuntas:

- a) Chorros Libres: La disipación de energía aparece como resultado de la resistencia del aire durante la caída. Esta disipación es significativa si la altura de caída es grande y la diferencia de velocidad entre el chorro y el aire es considerable.
- b) Cuenco de disipación: La disipación de energía corresponde a la energía consumida en la formación de vórtices producidos en las zonas de alto gradiente de velocidad. Por tanto para lograr altos niveles de disipación es importante generar zonas de alta turbulencia.

En ambos casos si la perturbación provocada en la masa del fluido (agua-aire) es alta, se logrará una mayor disipación y difusión del chorro en el colchón de agua.

La energía de impacto contra la contrapesa puede llegar a ser importante si la longitud del cuenco disipador no es suficiente para albergar el resalto hidráulico, pudiendo incidir el chorro de pared en la contrapesa con una velocidad elevada.

IV.3. Fases vuelo del chorro a través de la atmósfera.

La caída del agua a través de la atmósfera, se estudia a partir de la teoría de los chorros turbulentos. **Ervin y Falvey (1987)**, resumen en su estudio las características y fases de los chorros turbulentos libres (ver Figura IV.3).

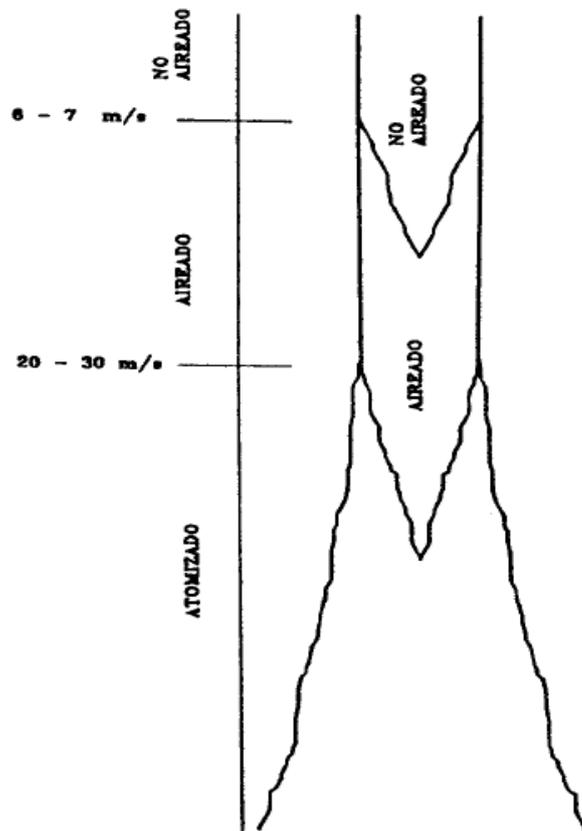


Figura IV.3: Fases del vuelo de un chorro turbulento (Ervine y Falvey, 1987, adaptado por Castillo, 1989)

Primera Fase: Chorro Turbulento no aireado

En tanto no se inicie la aireación del chorro, se tiene una caída libre de agua con una intensidad de turbulencia que depende del vertedero y la forma de aproximación al mismo desde aguas arriba.

Segunda Fase: Aireación del chorro

La velocidad relativa entre el chorro turbulento y el aire aumenta la turbulencia; los esfuerzos provocados por la turbulencia en la superficie del chorro vencen a la tensión superficial, por lo que se introducen burbujas en el chorro. Con una turbulencia inicial baja, esta segunda fase se inicia cuando el chorro alcanza una velocidad de 6 o 7 m/s.

Tercera Fase: Chorro turbulento aireado

El chorro, ya aireado, va ganando velocidad. El efecto de introducción de aire en el chorro, apenas elimina energía al flujo.

Cuarta Fase: Atomización de chorro

La sucesiva aireación e incremento de velocidad relativa entre el chorro y el aire, llegan a provocar el arranque de gotas de agua. Estas gotas pronto serán frenadas y alcanzarán su velocidad límite de caída libre en el aire. Se puede decir que no afectarán al cuenco disipador. Sin embargo algunos investigadores, han estudiado este fenómeno junto con el de las salpicaduras y lo definen como efectos nocivos para el funcionamiento de las centrales hidroeléctricas.

El inicio de esta fase se da para velocidades de caída entre 20 y 30 m/s.

Quinta Fase: Chorro atomizado

Todo el chorro se ha ido desintegrando y tenemos, en el cuenco, una amplia zona de lluvia.

IV.3.1. Longitud de rotura y espesor del chorro para el caso de flujo en napa.

Inicialmente, se consideraba que la gravedad no afecta considerablemente a la longitud de rotura del chorro. Sin embargo teórica y experimentalmente los datos revelan que los efectos de la gravedad se deben tener en cuenta en los chorros verticales, puesto que la longitud de rotura de un chorro vertical es mayor que en el caso de chorros horizontales.

Las condiciones de vertido, situadas en la salida del aliviadero vienen definidas por la velocidad media $V_i = (2gh_o)^{1/2}$, donde h_o es aproximadamente igual a dos veces la carga sobre el vertido, h . Las condiciones incidentes a la entrada del cuenco son la velocidad media, V_j y el espesor del chorro, $B_j = B_g + \zeta$; donde B_g es el espesor por las condiciones de gravedad y ζ es la expansión lateral del chorro por efecto de la turbulencia.

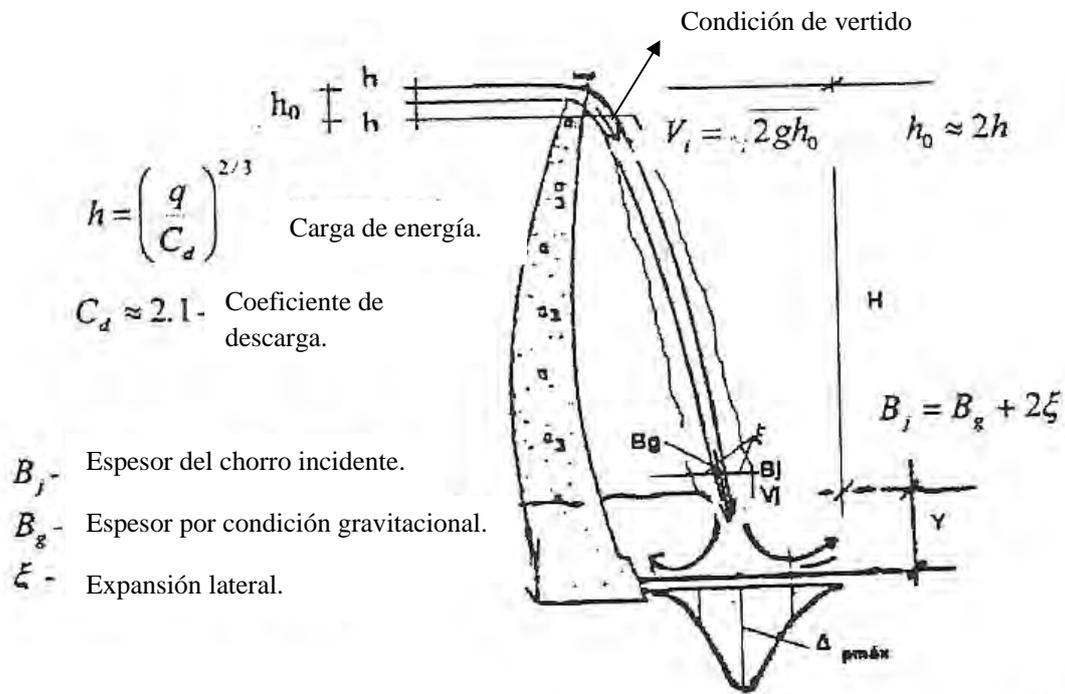


Figura IV.4: Caída del chorro en cuenco al pie de la presa (Castillo, 2006)

A fin de estimar la intensidad de turbulencia en las condiciones de vertido del chorro, T^*_u , y la longitud de rotura del chorro en chorros rectangulares o caso del flujo en napa, L_b , Castillo (2006) usa como punto de partida la ecuación experimental de la longitud de rotura para chorros circulares establecido por Ervine (1997), de este modo:

$$T^*_u = \frac{q}{IC} \quad (4.1)$$

Donde q es el caudal específico e IC representa las condiciones iniciales del flujo en el momento de emisión.

$$IC = \frac{14.95 g^{0.50}}{K^{1.22} C_d^{0.19}} \quad (4.2)$$

El coeficiente de descarga es $C_d \approx 2.1$ en el caso de un aliviadero hidrodinámico y $K \approx 0.85$. La longitud de ruptura del chorro queda:

$$\frac{L_b}{B_i F_i^2} = \frac{0.85}{(1.07 T_u F_i^2)^{0.82}} \quad (4.3)$$

Donde B_i y F_i son el espesor del chorro y el número de Froude en condiciones de vertido y T_u es la intensidad de la turbulencia inicial (condiciones críticas del flujo) ($0 \leq T_u \leq 3\%$).

Para igualdad de los flujos específicos, el chorro circular es mucho más compacto que el chorro rectangular.

La longitud de rotura del chorro, L_b , constituye un importante parámetro. Más allá de esta distancia, el chorro está completamente disgregado, ya no contiene su núcleo central, siendo que esencialmente consta de gotas de agua que se van volviendo más pequeñas y frenando s debido a la resistencia del aire, hasta que finalmente se alcanza la velocidad terminal. Este caso límite ocurre cuando la resistencia del aire es igual al peso individual de la gota de agua, de manera que reduce la capacidad erosiva del chorro totalmente desarrollado (Annandale, 2006).

Una vez que el chorro golpea la superficie del cuenco, el aire mezclado es arrastrado por el chorro, generándose la difusión del mismo. Se puede considerar que la parte sólida del chorro está completamente desintegrada a una profundidad aproximadamente de cuatro veces el espesor del chorro, B_j

El espesor del chorro rectangular se puede obtener como (Castillo, 2006):

$$B_j = \frac{q}{\sqrt{2gH}} + 4\varphi\sqrt{h_0} \left[\sqrt{H} - \sqrt{h_0} \right] \quad (4.4)$$

Donde H es la diferencia del nivel de agua entre aguas arriba y el calado en el colchón amortiguador h_0 es igual a dos veces la carga en el aliviadero, ($h_0 \approx 2h$) (ver Figura IV.4) y $\varphi = 1.07 T_u^*$.

IV.4. Comportamiento del flujo dentro del cuenco.

A continuación se comentan los principales resultados del estudio teórico-experimental de la disipación de energía bidimensional realizado por **Moore (1943)** para estructuras de caída vertical.

Moore considera la energía H_I en la base de la caída como la suma de la carga de velocidad media $v_1^2/2g$, más el calado promedio del flujo en dicha sección, y_1 , (Figura IV.5).

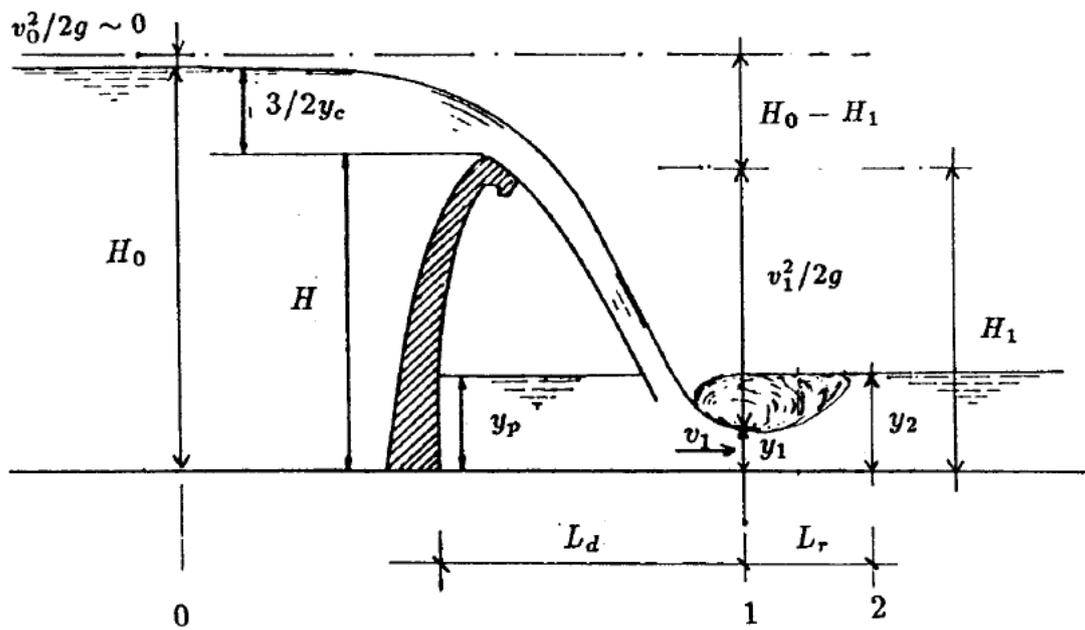


Figura IV.5: Principales magnitudes de los disipadores de energía hidráulica a pie de presa (Castillo, 1989).

En la Figura IV.6, se presentan los valores experimentales de H_I/y_c en función de H/y_c , confrontándose con los obtenidos por la aplicación de la ecuación de la energía sin considerar las pérdidas de carga, es decir:

$$H_I = H + \frac{3}{2}y_c \quad (4.5)$$

$$H_I = \frac{H_0}{y_c} = \frac{H}{y_c} + \frac{3}{2} \quad (4.6)$$

Donde:

$$y_c = \sqrt{\frac{q^2}{g}}; \text{ Calado crítico en una sección rectangular}$$

$H \approx$ Altura de caída

$H_1 \approx$ Energía total en la base de la caída

$q \approx$ Caudal específico

$g \approx$ Aceleración de la gravedad

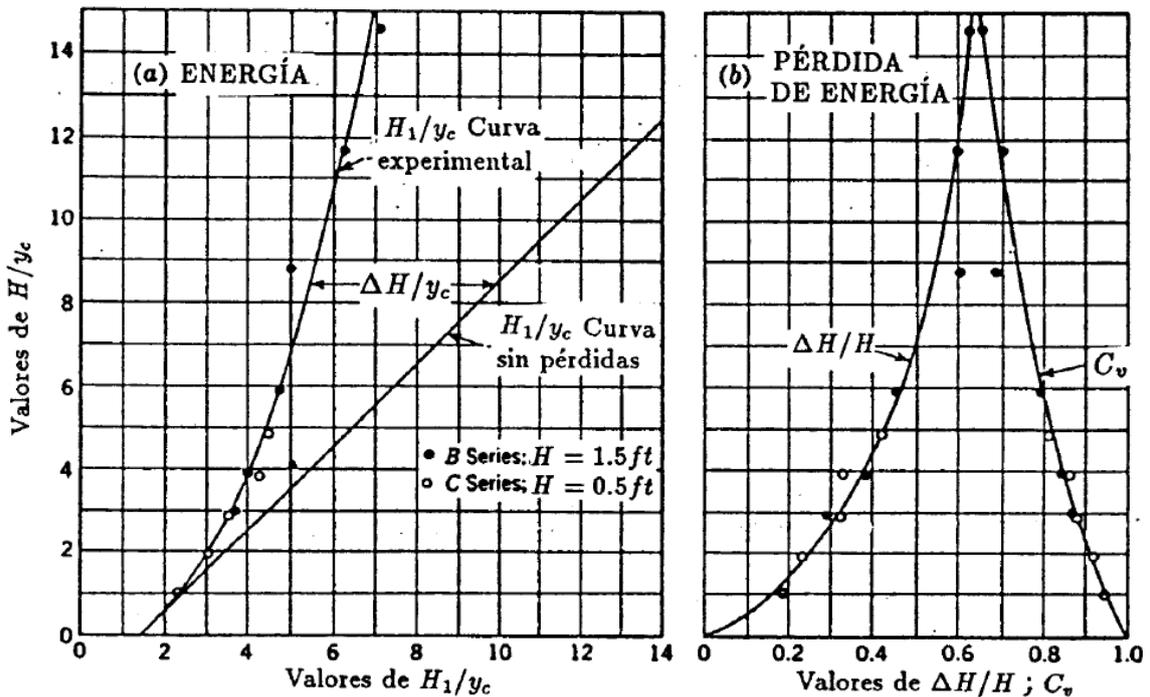


Figura IV.6: Energía en la base de una caída vertical (a) Energía teórica experimental; (b) Pérdida de energía y coeficiente de velocidad (Moore, 1943, adaptado por Castillo, 1989).

La diferencia entre las curvas teórica y experimental representa la pérdida de energía dividida entre el calado crítico, $\Delta H/y_c$.

En la figura IV.6. (b) se presenta el efecto de H/y_c sobre la pérdida de energía. Podemos observar que se puede disipar hasta las dos terceras partes de la altura de caída ($0.66H$).

En el gráfico se concluye que para un caudal y una altura de caída determinada, se consigue incrementar la disipación de energía aumentando el ancho del vertedero, lo que implica una reducción del calado y_c .

También en la figura IV.6. (b) se presentan los valores del coeficiente de velocidad C_v en función de H/y_c . La velocidad media real en la base de la caída se expresa como:

$$v_1 = C_v \sqrt{2g(H_0 - y_1)} \quad (4.7)$$

En donde la energía total en el embalse es $H_0 = H + \frac{3}{2} y_c$

Si en la ecuación (4.6) se reemplaza el valor de H_0 , y además se introduce la ecuación de continuidad $v_1 y_1 = \sqrt{g y_c} y_c$, reordenando los términos, se obtiene la siguiente ecuación cúbica:

$$\left(\frac{y_c}{y_1}\right)^3 - C_v^2 y_c / y_1 \left(\frac{2H}{y_c} + 3\right) + 2C_v^2 = 0 \quad (4.8)$$

A partir de esta ecuación se puede calcular y_1 , dependiendo del valor de C_v , $v_1^2/2g$ puede calcularse teniendo en cuenta la ecuación (4.5). Con ambos términos se puede obtener y_1 este procedimiento es menos práctico que el uso de la figura IV.6 (a), la cual da directamente el contenido de la energía en la base de la caída.

El calado de agua correspondiente al pozo de acumulación, y_p , se determina a partir de la aplicación del teorema de la cantidad de movimiento, cuya ecuación resultante es:

$$\left(\frac{y_p}{y_c}\right)^2 = \left(\frac{y_1}{y_c}\right)^2 + 2\left(\frac{y_c}{y_1}\right) - 3 \quad (4.9)$$

Esta expresión concuerda con los resultados experimentales realizados por Moore (1943), tal como puede observarse en la figura IV.7 (a).

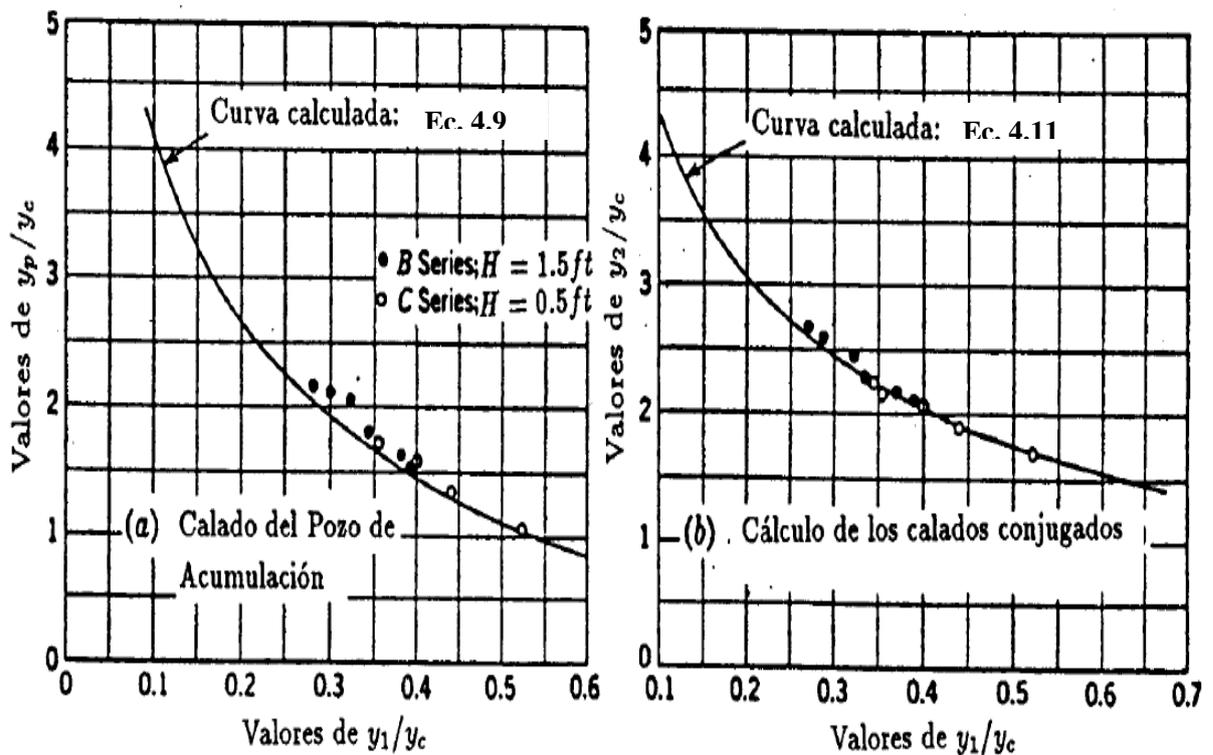


Figura IV.7: Curvas de las ecuaciones del momentum: (a) Calado del pozo de acumulación y_p (ec.4.9); (b) Calados conjugados y_1 e y_2 (ec.4.11) (Moore, 1943, adaptado por Castillo, 1989).

El calado conjugado, y_2 , se puede calcular a partir de y_1 , por medio de la ecuación de Belanguer, que para una sección rectangular es:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right] = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{y_c}{y_1} \right)^3} - 1 \right] \tag{4.10}$$

Dónde:

- $y_1 \approx$ Calado inicial del resalto hidráulico libre.
- $y_2 \approx$ Calado conjugado del resalto hidráulico libre

Esta expresión se puede poner de la forma:

$$\frac{y_2}{y_c} = \frac{y_1}{2y_c} \left[-1 + \sqrt{1 + 8 \left(\frac{y_c}{y_1} \right)^3} \right] \quad (4.11)$$

Moore (1943) realiza la comprobación experimental de estas ecuaciones. En la Figura IV.7 (b) se puede observar el buen ajuste de esta comprobación experimental.

El perfil longitudinal del resalto hidráulico producido en la base de una caída es semejante al producido por un chorro horizontal, aunque un poco más inclinado en la zona inicial. Para valores del calado aguas abajo superiores al calado y_2 , se produce una sumergencia del resalto hidráulico, lo que implica mayores velocidades junto al fondo según Moore (1943).

IV.5. Conceptos básicos del resalto hidráulico.

VI.5.1. Introducción

Un cuenco amortiguador es una obra de disipación de energía que se construye al final del canal de descarga del aliviadero para facilitar el cambio de régimen supercrítico a subcrítico mediante un resalto hidráulico. El cuenco ha de cumplir la condición de que el resalto que en él se produce sea estable para el rango esperado de caudales de vertido por el aliviadero. Los parámetros de diseño del cuenco son su ancho A_c , su longitud L_c y su profundidad sobre el lecho del río e .

El cálculo del cuenco suele consistir en la definición de la profundidad de excavación del lecho del río e y la longitud del cuenco, L_c . La profundidad de excavación se fija por medio de la ecuación del resalto hidráulico de los calados conjugados o de Belanger.

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8F_{r1}^2} - 1 \right] \quad (4.12)$$

Si la profundidad del cuenco es excesiva, se puede conseguir el calado necesario para el resalto, combinando la solución con la construcción de un azud aguas abajo del cuenco. Éste azud funciona con una carga pequeña y casi sumergido, por lo que la disipación de su energía es mucho menor que en el caso del aliviadero de la presa. Se trata de conseguir un resalto estable para el rango de caudales esperable durante la vida útil de la presa.

Si el calado conjugado y_2 fuera superior que el calado impuesto por el río, se formaría una curva de remanso en régimen supercrítico, desplazando el resalto hacia aguas abajo, pudiendo incluso salirse del cuenco.

La longitud del cuenco de disipación está expresado por:

$$L_c = K (y_2 - y_1) \quad (4.13)$$

Donde $4.5 < K < 5.5$. Los valores y_1 e y_2 son más bajos que K se aplican para $F_{r1} > 10$ mientras que se aplica los más altos para $F_{r1} < 3$. Donde F_{r1} es el número de Froude al inicio del resalto

Del lado de la seguridad, se considera $L_c = 6y_2$, siendo adecuado para $4 < F_{r1} > 10$. Dicha longitud se puede acortar si se dispone en el cuenco de dientes y elementos disipadores de energía (deflectores, bloques de impacto), llegando hasta valores de $L_c = 4.5 y_2$, sin embargo estos elementos se encuentran sujetos a problemas de cavitación, razón por la cual deben ser estudiados con mucho cuidado.

Cuando el flujo se ve sometido a la acción de la fuerza gravitatoria puede cambiar de un régimen lento o subcrítico (Número de Froude < 1) a un régimen rápido o supercrítico (Número de Froude > 1) como sucede en estructuras hidráulicas como aliviaderos, compuertas, vertederos en general, etc. El flujo debe regresar al régimen subcrítico en una longitud variable dependiendo de ciertas condiciones. Para esto es necesario disipar la gran cantidad de energía cinética ganada anteriormente por la acción de la gravedad. Dicha energía puede ser disipada mediante el resalto hidráulico.

El resalto hidráulico es una elevación abrupta en el nivel del agua que se produce cuando circula agua por un canal en régimen supercrítico y cambia a régimen subcrítico debido a las condiciones de flujo de aguas abajo, generándose al igualarse los momentos aguas arriba y aguas abajo.

La condición de flujo se define por el número de Froude. Para el caso de un canal rectangular:

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gy}} \quad (4.14)$$

Siendo:

$$V = \frac{Q}{A}, \text{ velocidad media de la sección transversal}$$

$$\sqrt{gy} \approx \text{celeridad de la onda superficial del agua}$$

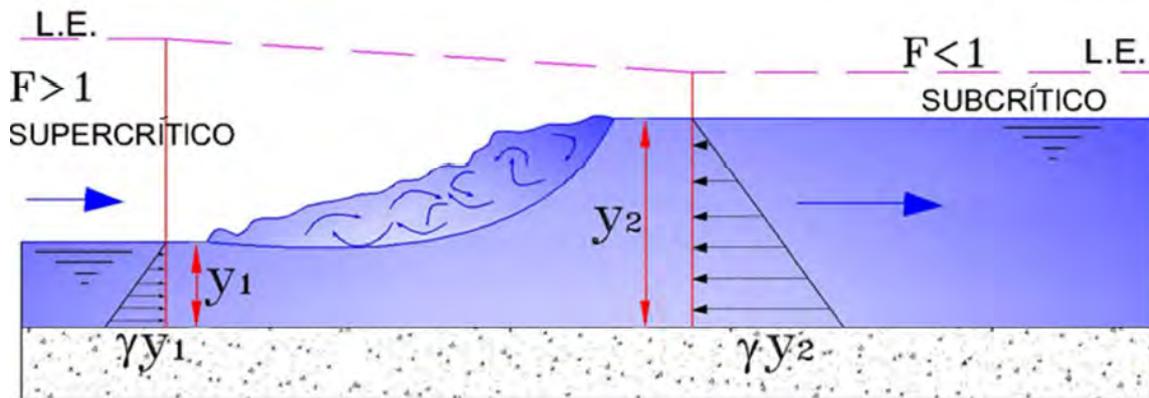


Figura IV.8: Esquematación gráfica de la formación de un resalto hidráulico y sus parámetros (Molina Miñano, 2010).

Si el resalto resulta rechazado, es decir que su formación se presenta alejada del pie de la estructura considerada; toda esa longitud debe ser protegida contra la socavación, lo cual no resulta económicamente conveniente, razón por la cual se coloca un cuenco amortiguador en esa zona.

IV.5.2. Resalto hidráulico sumergido.

En este caso el cuerpo del resalto no está en contacto directo con la atmósfera, puesto que se encuentra cubierto por agua desde su inicio (Figura IV.9).

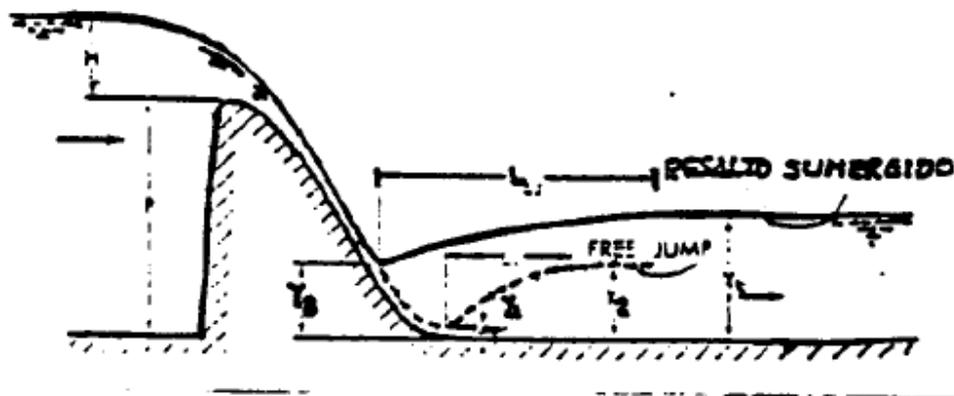


Figura IV.9: Representación del resalto hidráulico sumergido (Castillo, 1987).

Se ha observado que cuando se incrementa el nivel del calado aguas abajo, el inicio del resalto se mueve hacia aguas arriba y se adhiere al chorro como flujo de transición. Cuanto más se incrementa el nivel del calado aguas abajo, más turbulento se vuelve el resalto. El aire solamente entra en el resalto en períodos limitados de tiempo y el cuerpo del resalto se mueve contra el chorro para separarse después en un corto período de tiempo.

El resalto hidráulico sumergido viene especificado por el número de Froude F_1 y un factor de inmersión S , dado por:

$$S = \frac{(y_t - y_2)}{y_2} \quad (4.15)$$

Siendo; $y_2 < y_t$

$y_2 \approx$ calado conjugado de y_1

$y_t \approx$ condición aguas abajo

$y_3 \approx$ calado de sumergencia

La pérdida de energía en un resalto sumergido puede ser mayor que la correspondiente a un resalto clásico ya que el volúmen de un resalto sumergido es mayor que el de un resalto clasico. Dicho criterio sirve como base de diseño.

Por aplicación del teorema de la cantidad de movimiento queda definida la relación

$$\psi = \frac{y_3}{y_1} :$$

$$\psi = \left[\frac{(1+s)^2}{4} (\sqrt{1+8F_1^2} - 1)^2 - 2F_1^2 + \frac{4F_1}{(1+s)(\sqrt{1+8F_1^2} - 1)} \right]^{1/2} \quad (4.16)$$

IV.5.2.1. Longitud del resalto sumergido.

La longitud del resalto sumergido puede obtenerse a través de la ecuación empírica propuesta por Rajarathnam:

$$\frac{L_j}{y_2} = 6.1 + 4.9S_j \quad (4.17)$$

La longitud de este tipo de resaltos es considerablemente mayor, respecto a la de los resaltos clásicos.

IV.5.2.2. Altura relativa del resalto.

La altura queda definida por el factor; $\omega = \frac{y_t - y_3}{y_2 - y_1}$, el cual viene dado por la siguiente ecuación:

$$\omega = \frac{(1+s)\left(\sqrt{1+8F_1^2}-1\right)-2\psi}{\left(\sqrt{1+8F_1^2}-3\right)} \quad (4.18)$$

IV.5.2.3. Pérdida de energía y eficiencia.

La disipación de energía es una de las funciones principales del resalto hidráulico. En un canal horizontal, la pérdida de energía cercana al resalto será:

$$\Delta E = E_1 - E_2$$

Dónde:

$E_1 \approx$ es la energía específica en la sección 1 (inicio del resalto hidráulico)

$E_2 \approx$ es la energía específica en la sección 2 (final del resalto)

La pérdida de energía ΔE en el salto hidráulico se calcula a partir de la ecuación de la energía, suponiendo que $\alpha_1 \approx \alpha_2 \approx 1$; por tanto:

$$\Delta E = \left(\frac{v_1^2}{2g} + y_1\right) - \left(\frac{v_2^2}{2g} + y_2\right) \quad (4.19)$$

Donde:

$\alpha_1 \approx$ Coeficiente de corrección de energía cinética, al inicio del resalto

$\alpha_2 \approx$ Coeficiente de corrección de energía cinética, al final del resalto

De este modo se obtienen:

$$\frac{\Delta E}{y_1} = \frac{\left(\frac{y_2}{y_1} - 1\right)^3}{4 y_2 / y_1} \quad (4.20)$$

La pérdida de energía se expresa generalmente como una pérdida relativa $\frac{\Delta E}{E_1}$, o como eficiencia $\frac{E_2}{E_1}$.

IV.5.3. Circulación del flujo en el cuenco en función del calado aguas abajo.

Las condiciones de flujo en el cuenco, pueden clasificarse en tres tipos diferentes de acuerdo al calado aguas abajo, y_b , (Figura IV.10):

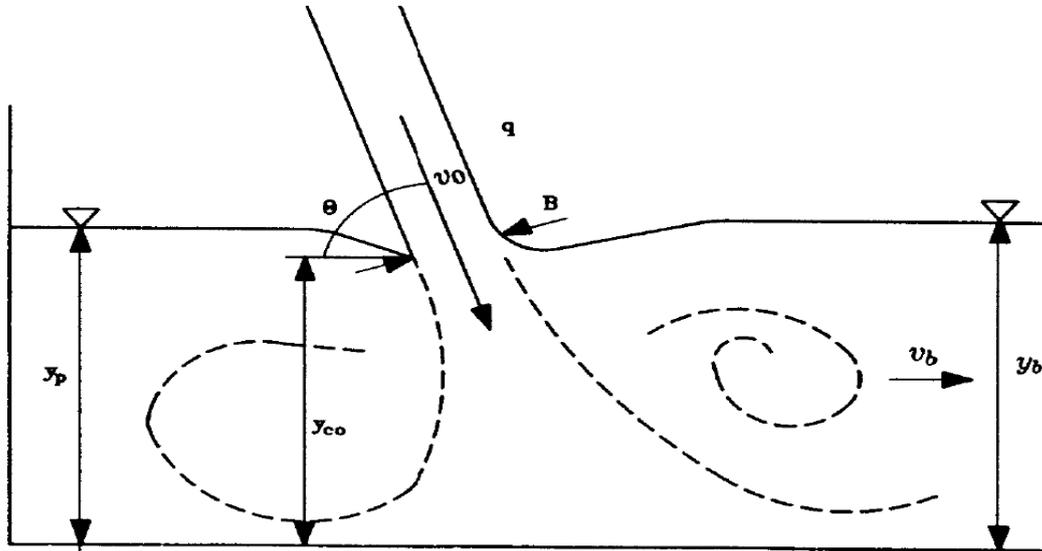


Figura IV.10: Condiciones del flujo en la solera, de acuerdo al calado aguas abajo y_b (Cui Guang Tao, 1985, adaptado por Castillo, 1989).

Tipo I: $y_b < y_2$

El calado de aguas abajo es inferior al calado preciso para crear un resalto. En estas condiciones no se forma un verdadero colchón aguas abajo del punto de impacto. Sin embargo, aguas arriba de este punto se forma un colchón de agua de espesor y_p , creando en la zona de caída del chorro un calado y_{co} , el cual contribuye a la amortiguación.

Tipo II: $y_b > y_2$

Se forma un resalto hidráulico sumergido de modo que se obtienen colchones de agua verdaderos, tanto aguas arriba como aguas abajo del punto de caída. Para obtener este tipo de flujo se debe verificar que $y_{co}/B < 20$, donde B es el espesor del chorro a la entrada del cuenco.

Tipo III: $y_{co}/B > 20$

La inclinación de la superficie libre, aguas arriba y aguas abajo del punto de caída, disminuye rápidamente; la diferencia entre y_{co} e y_b tiende a cero.

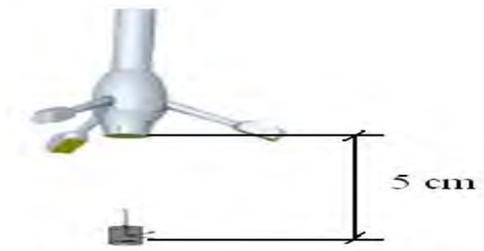
En las obras reales, en donde exista o no una solera artificial, se busca garantizar las condiciones de flujo Tipos II o III.

V. FILTRADO DE DATOS.

V.1. Problemática de la sonda Doppler ADV.

El equipo de medida de velocidades instantáneas ADV necesita estar completamente sumergido para poder muestrear, puesto que el agua constituye el elemento fundamental de transmisión del sonido, con lo que es fiable en flujos unifásicos sin presencia de aire.

La principal limitación de la sonda radica en las propiedades geométricas del sistema de adquisición de datos el cual exige un calado superior a 5 cm. Esto se debe a que el equipo Doppler necesita un rebote de la onda sobre un volumen de muestreo situado, a una distancia de 5 cm (Figura V.1).



Las medidas de velocidades instantáneas con instrumentación Doppler son muy útiles en ingeniería hidráulica y ayudan a caracterizar el flujo en laboratorio y en el campo (ríos, canales, estructuras hidráulicas, etc.).

Figura V.1: Umbral de medición del equipo ADV (García, 2008).

Sin embargo, para el caso de flujos altamente turbulentos y aireados, las señales suelen estar afectadas, en mayor o menor grado, por la presencia de burbujas de aire que se interponen en la recepción de datos, y en consecuencia los registros de velocidad obtenidos con un equipo ADV suelen estar afectados por diferentes señales parásitas denominados “spikes”. El origen de dichos fenómenos que alteran e interfieren en las señales de muestreo se debe a los diversos factores:

- a) **Ruido blanco.** Señales parásitas muy complicadas de detectar y eliminar. Un ADV es capaz de medir velocidades medias de flujo con precisiones superiores al 4%. Las medidas de los diferentes índices turbulentos con alta resolución son únicamente posibles con señales coherentes pulso a pulso, sin embargo, la señal sufre contribuciones de ruidos parásitos que tienen lugar debido a que el contenido de energía está uniformemente distribuido en el dominio de la frecuencia investigada (ruido blanco) (Blanckaert y Lemmin, 2006), también es incesgado: $\sigma_i = 0$. Este fenómeno no afecta la estimación de las velocidades medias temporales. Hunther y Lemmin (2006) propusieron un método de corrección directa que permite eliminar la mayoría del ruido blanco en las medidas de turbulencia. Para esto se requiere que el equipo ADV tenga cuatro receptores, disponiendo de esta forma de información redundante en una de las componentes de velocidad.

- b) Flujos con alta intensidad de turbulencia y aireados, Las burbujas de aire que atraviesan el volúmen de muestreo, se interponen a las ondas sónicas emitidas por el equipo, produciendo así un error en la adquisición de la velocidad real (spike), lo que evidencian su afección con la presencia de spikes puntuales aleatorios claramente realzados (Figura V.2).

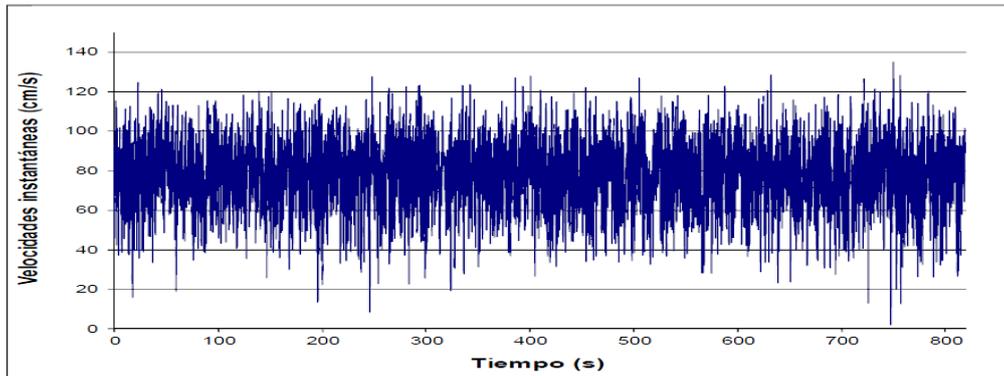


Figura V.2: Registro base o casi limpio obtenido en un resalto hidráulico. Afectado principalmente por la alta turbulencia y la presencia de aire (Molina Miñano, 2010).

- c) Ambigüedades por diferencia de fase, Ocurre cuando el pulso entrante y saliente se realiza fuera del rango entre 180° y -180° generando ambigüedad y causando un spike en el registro. En nuestro caso se producen cuando la velocidad real excede el límite superior del rango de velocidad calibrado en el equipo. De este modo pueden aparecer múltiples spikes continuados que invalidan el registro (Figura V.3).

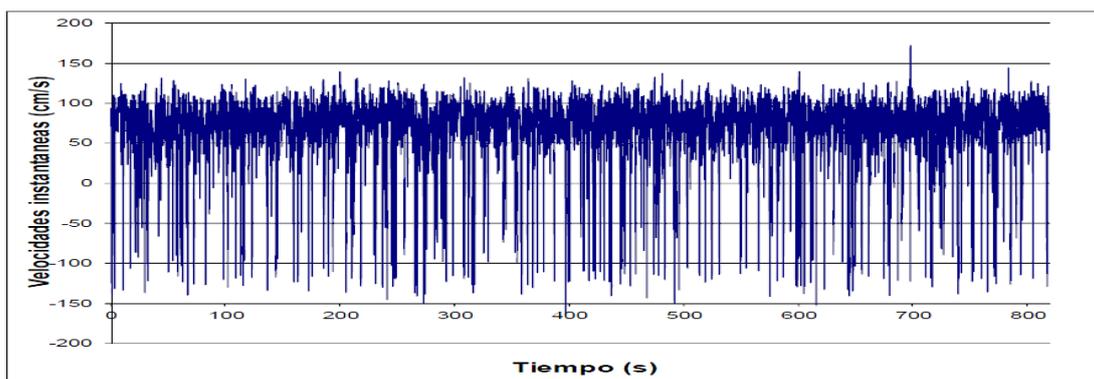


Figura V.3: Registro patológico obtenido en un resalto hidráulico. Afectado principalmente por el fenómeno de ambigüedad por diferencia de fase (Molina Miñano, 2010).

Aunque los spikes en algunos casos pueden ser reducidos o incluso eliminados por el ajuste de los parámetros del equipo de medida, existen situaciones en las cuales no pueden ser totalmente evitados. Un caso particular lo constituye el resalto hidráulico se caracteriza por un levantamiento brusco de la superficie libre, con fuerte disipación de energía y mezcla, alta intensidad de turbulencia y entrada de aire, generación de ondas y spray.

V.2. Pasos del filtrado de datos.

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

El proceso de eliminar spikes involucra dos pasos: (1) detectar el spike y (2) reemplazar el spike. Los dos pasos son independientes pero en los métodos iterativos, el reemplazo del spike puede afectar la detección del mismo en las siguientes iteraciones.

Detección:

El primer paso implica la elección de criterios de detección de spikes. Para ello se emplean parámetros físicos y/o estadísticos correctamente justificados que llamaremos umbrales.

La detección debe ser selectiva y crítica, pues no debe alterar significativamente la serie de datos original. Dos de los parámetros relevantes en la aplicación de los distintos métodos de filtrado son el umbral de aceleración y el umbral de velocidad, que para el caso de flujos turbulentos presentan diferentes particularidades.

Reemplazo:

El reemplazo es de vital importancia si se pretende conservar la serie de datos completa para su posterior tratamiento (descomposición frecuencial, etc.). En este proyecto se ha tomado como sistema de reemplazo de datos, el de sustitución por la media de los datos anterior y posterior al spike a reemplazar.

V.3. Métodos de filtrado de datos.

V.3.1. Método del umbral de aceleración y velocidad, ATM (Goring y Nikora, 2000)

El método del umbral de aceleración y velocidad (ATM) es un método de detección y reemplazo en dos fases: una para aceleraciones negativas y la otra para aceleraciones positivas. En cada fase, se repetirá el procedimiento hasta que no vuelvan a detectarse nuevos spikes o dicho de otra forma, hasta que todos los datos cumplan el criterio de aceleración y velocidad establecido.

Para que un registro sea considerado como spike, la aceleración debe exceder un umbral λ_{ag} y la desviación absoluta de la velocidad media tiene que exceder el valor, σk donde λ_a es un umbral de aceleración relativa, σ es la desviación estándar y k un factor a ser determinado. A continuación se indican los pasos en cada fase:

Primera Fase:

- a) Calcular la aceleración con $a_i = (u_i - u_{i-1}) / \Delta t$, donde u_i es la velocidad registrada en el tiempo i y Δt el intervalo de muestreo.
- b) Identificar los puntos donde $a_i < -\lambda_{ag}$ y $u_i < -k\sigma$ y reemplazarlos

El paso 2 se repite hasta que no se detecten más spikes. Entonces se inicia la segunda fase:

- a) Calcular la aceleración como en la primera fase
- b) Identificar los puntos donde $a_i < -\lambda_{ag}$ y $u_i < -k\sigma$ y reemplazarlos

Goring y Nikora (2002) indican que una buena elección de los parámetros son los siguientes: $\lambda_a = 1-1.5$ y $k = 1.5$.

V.3.2. Método ATM+C

En las mediciones realizadas dentro de resaltos hidráulicos, (Castillo, 2009) propone que el umbral de aceleración λ_a se calcule en función de la posición del punto de medida d_j dentro del resalto y de su correspondiente número de Froude Fr_j :

$$\lambda_a = \frac{Fr_j \sqrt{y_j}}{\Delta t \sqrt{g}} \geq 0.5 \quad (5.1)$$

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, según la Figura V.4.

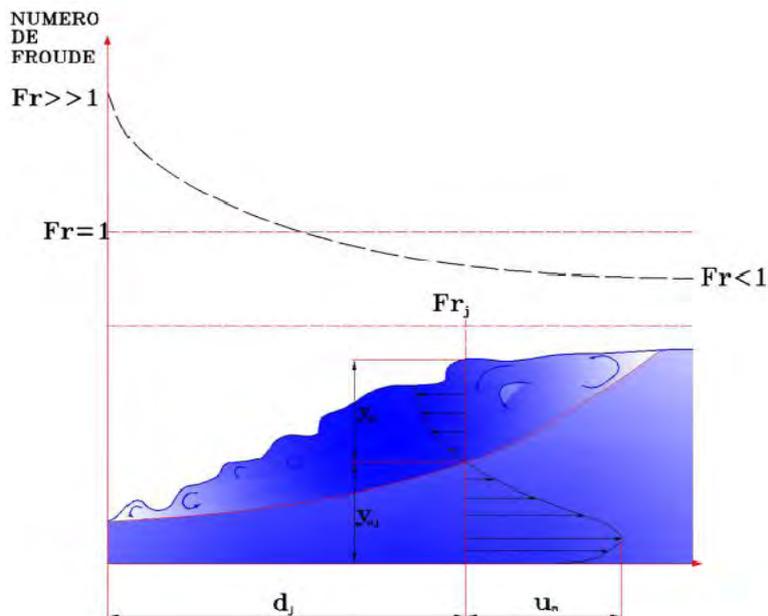


Figura V.4: Variación del número de Froude y definición de los parámetros en un resalto hidráulico (Molina Miñano, 2010).

Del análisis de los diferentes registros de velocidades instantáneas medidos dentro de resaltos hidráulicos (Método ATM+C; Castillo, 2009), Molina Miñano (2010) establece que la elección de parámetros para este tipo de flujos será:

$$\lambda_a = \frac{Fr_j \sqrt{y_j}}{\Delta t \sqrt{g}} \quad \text{y} \quad k = 2.5$$

El método ATM+C, basado en el método ATM de Goring y Nikora, constituye el procedimiento más adecuado y robusto para la detección y reemplazo de spikes en el caso de resaltos hidráulicos (Molina Miñano,2010).

V.3.3. Método del umbral de correlación.

El coeficiente de correlación de ADV es un parámetro de calidad del equipo. El ADV calcula tres valores de correlación, uno para cada receptor acústico, con cada muestra de velocidad. La correlación se expresa como un porcentaje. La correlación perfecta indica una fiabilidad del 100%, en mediciones de velocidad con bajo ruido. La correlación 0% indica que el valor de velocidad de salida está dominado por el ruido (no hay señal coherente).

La correlación puede usarse para revisar la calidad de los datos durante la recopilación y para filtrar los datos en la fase postprocesado. Por ejemplo, si el ADV está siendo usado en sondas que periódicamente está fuera del agua, los valores de correlación pueden usarse para determinar que parte de los datos pueden ser usados y cuales desechados.

Idealmente, los valores de correlación deben estar entre 70 y 100%. Los valores por debajo del 70% indican que el ADV está operando en un régimen de medida difícil, la sonda está fuera del agua, la SNR es demasiado bajo, o que puede pasarle algo al ADV. En ciertos entornos (flujos altamente turbulentos, agua altamente aireada), puede no ser posible lograr altos valores de correlación. Los valores de correlación bajos afectarán la variabilidad a corto plazo en los datos de velocidad (por ejemplo con un aumento del ruido), pero no predisponen las mediciones de velocidad media. Para mediciones de velocidad media se pueden usar valores de hasta el 30% de correlación.

V.4. DESARROLLO Y APLICACIÓN.

Para realizar el filtrado se ha empleado el programa Explore V Pro, el cual permite editar las series de datos de manera que se puedan eliminar y sustituir los errores en la adquisición de velocidades (spikes), presentes en la medición de velocidades en un flujo bifásico. Para llevar a cabo el filtrado hay que definir un método de filtrado y sus correspondientes parámetros. De este modo, el programa realiza el filtrado de manera automática, obteniéndose como resultado la serie modificada con nuevos valores estadísticos.

En nuestro caso el objetivo de este apartado consiste en analizar tres series de velocidades seleccionadas teniendo en cuenta su intensidad de turbulencia y desviación estándar. A la hora de comparar y definir un método de filtrado eficaz, consideramos los valores establecidos por Goring y Nikora (2002) y por Molina Miñano (2010) para el umbral de velocidad y umbral de aceleración.

Tras realizar el filtrado con diferentes métodos se puede comparar y visualizar como varía la desviación estándar así como el número de spikes detectado, lo que nos servirá de guía a la hora de elegir un método de filtrado adecuado para cada nivel de turbulencia.

A continuación se desarrollan y se exponen los resultados del proceso de filtrado de las tres series analizadas:

V.4.1. Filtrado de la serie con turbulencia alta.

Para configurar el filtrado de las series de datos de turbulencia alta se considera un caudal de 45.31 l/s. Se elige el punto situado a 30 cm del impacto del chorro sobre el cuenco de amortiguación y registrado a una altura de $y=4$ cm en el interior del colchón de agua de $Y=25$ cm, generado por dos barreras.

El perfil de velocidades tanto horizontal como vertical lo obtenemos a partir de los datos de la sección $X=30$ cm, se muestra en la Figura V.5:

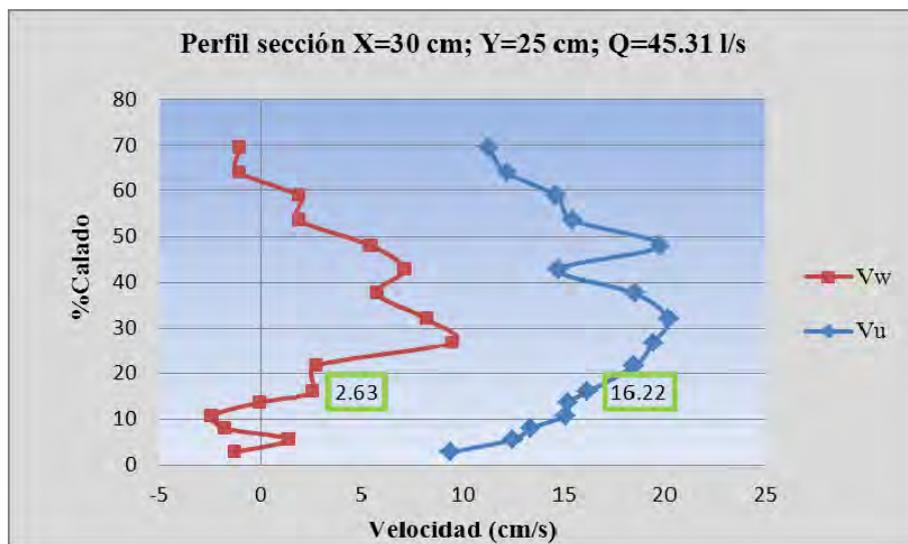


Figura V.5: Perfil de velocidad horizontal y vertical en la sección considerada para el punto de turbulencia alta.

A partir del perfil de velocidad horizontal (V_u) de la Figura V.5, se puede obtener el umbral de aceleración λ_a , basándonos en el calado en el que se produce el cambio de sentido del flujo para obtener d_j dentro del resalto hidráulico.

El número de Froude, se obtiene a partir de la velocidad media de la sección:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gy}} \quad (5.2)$$

Dónde:

$v \approx$ Velocidad media de la sección (m/s)

$y \approx$ Calado de la sección (m)

$$V_{Med} = \frac{Q}{b \cdot y} \quad (5.3)$$

$Q \approx$ Caudal circulante (m^3/s)

$b \approx$ Ancho cajón (m)

$$V_{Med} = \frac{0.04531}{1.05 \times 0.25} = 0.1726 \text{ m/s} \quad \longrightarrow \quad F_r = \frac{0.1726}{\sqrt{9.8 \times 0.25}} = 0.11$$

Al observar el perfil, no se aprecia un punto de inflexión donde se produzca un cambio en el signo de las velocidades horizontales registradas, por lo que el valor de y_j , corresponde a un valor de calado $Y = 25$ cm. De este modo:

$$\lambda_a = \frac{F_r \sqrt{y_j}}{\Delta t \sqrt{g}} = \frac{0.11 \sqrt{0.25}}{0.1 \sqrt{9.8}} = 0.176$$

$$\text{Puesto que, } \lambda_a \leq 0.5 \quad \longrightarrow \quad \lambda_a = 0.5$$

Para realizar una valoración objetiva en cuanto a la variación de las velocidades, se grafica la serie de datos original junto a los resultados de los distintos métodos de filtrado.

Además, se han establecido unas franjas guías para considerar como referencias en el filtrado de velocidades.

A continuación se recopilan las distintas pruebas realizadas a la serie, junto a sus resultados comparados con la serie original:

	Umbral de aceleración λ_a	Umbral de velocidad K	Velocidad (cm/s)	Desviación Típica (cm/s)	Número Spikes	%Datos originales
Serie original			16.22	151.54		100
Goring y Nikora	0.5	1.25	16.14	105.65	4984	0.32
Goring y Nikora	1	1.5	25.79	143.49	4901	1.98
Goring y Nikora	1.5	1.5	33.60	89.94	4749	5.02
Molina Miñano	0.5	2.5	14.09	102.64	4983	0.34
		1	31.49	82.62	3665	26.7
		1.5	30.74	116.43	2061	58.78
		1.75	24.82	130.70	1265	74.7
		2	23.68	143.51	620	87.6
		2.25	17.45	152.21	152	96.96
		2.5	16.46	152.14	49	99.02
	1		22.34	106.62	4893	2.14
	1.5		27.31	97.67	4711	5.78
	1.75		26.08	94.69	4571	8.58
	2.25		31.55	96.56	4255	14.9
	1.5	2	29.83	86.19	4720	5.6
	2.25	2.5	31.90	96.81	4264	14.72
	2.5	2	29.03	96.76	4156	16.88

Tabla 4: Resultados de los métodos de filtrado para una serie con turbulencia alta.

Los resultados gráficos de la aplicación de los distintos métodos de filtrado para el punto de turbulencia alta se muestran a continuación:

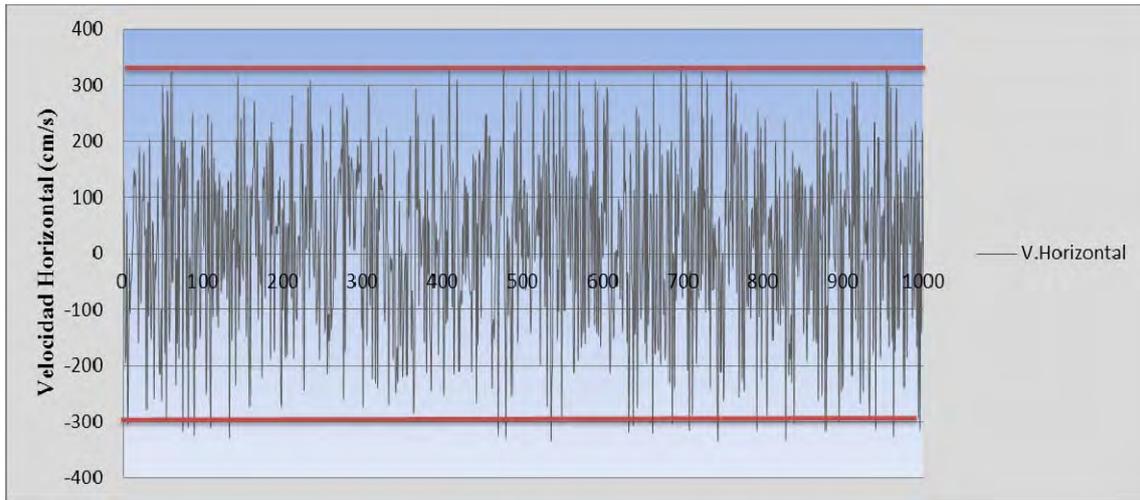


Figura V.6: Serie de datos original, con turbulencia alta.



Figura V.7: Serie de datos filtrada con $\lambda=1.5$ y $k=1.5$, Goring y Nikora (2002).

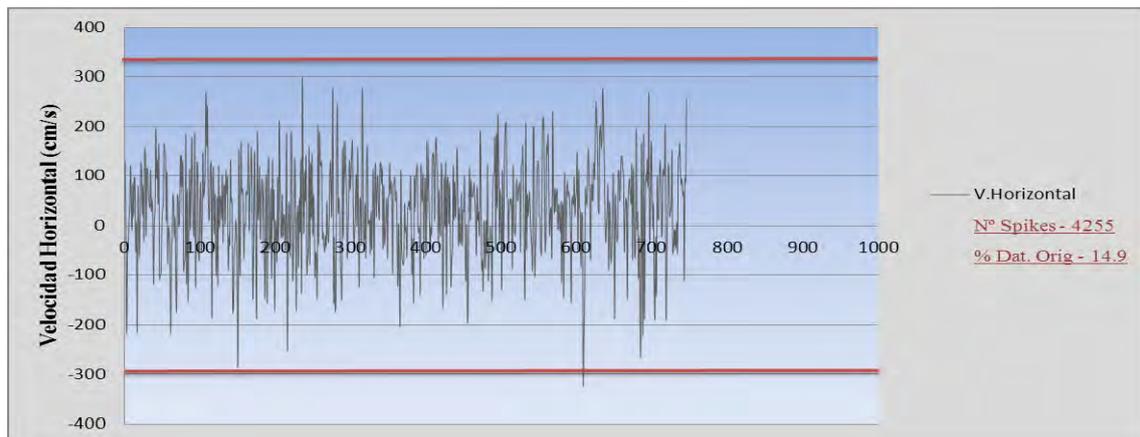


Figura V.8: Serie de datos filtrada con $\lambda=2.25$.

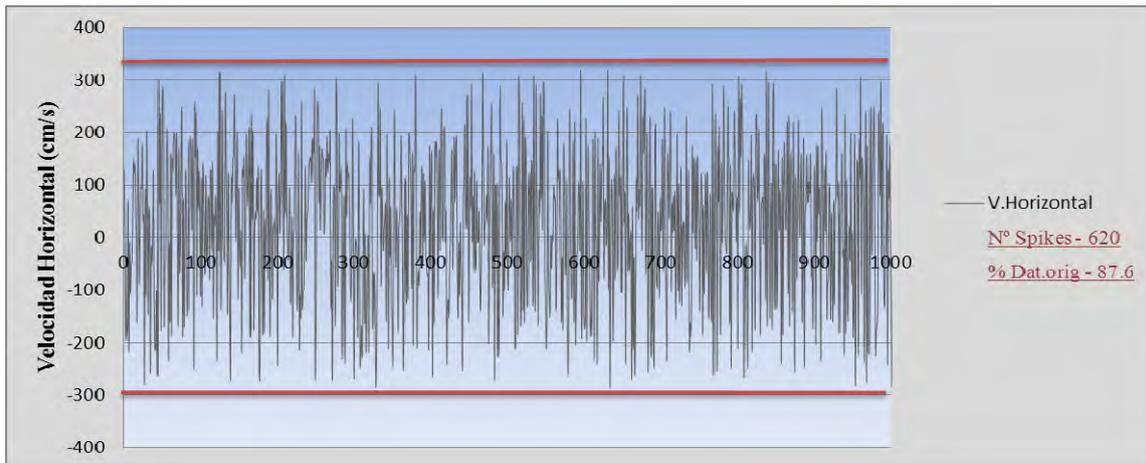


Figura V.9: Serie de datos filtrada con $k=2$.

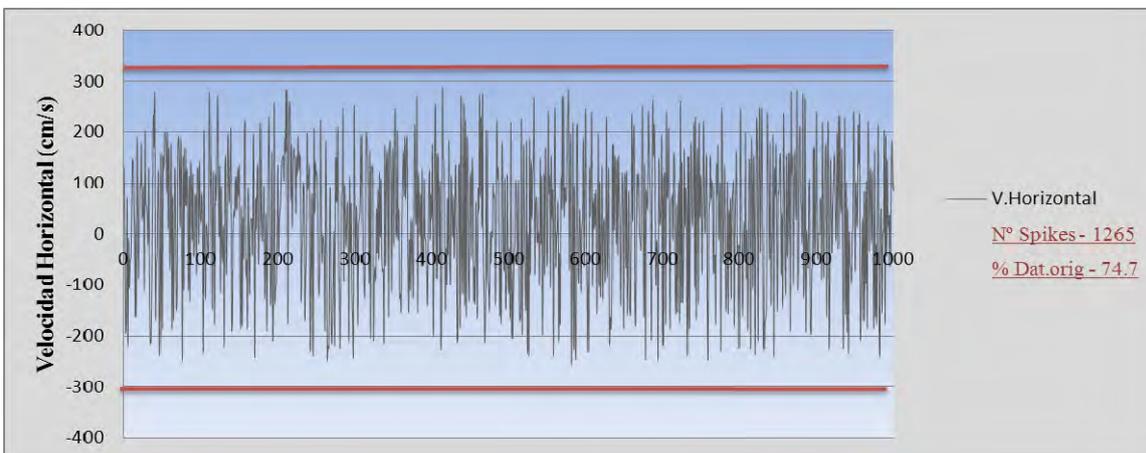


Figura V.10: Serie de datos filtrada con $k=1.75$.

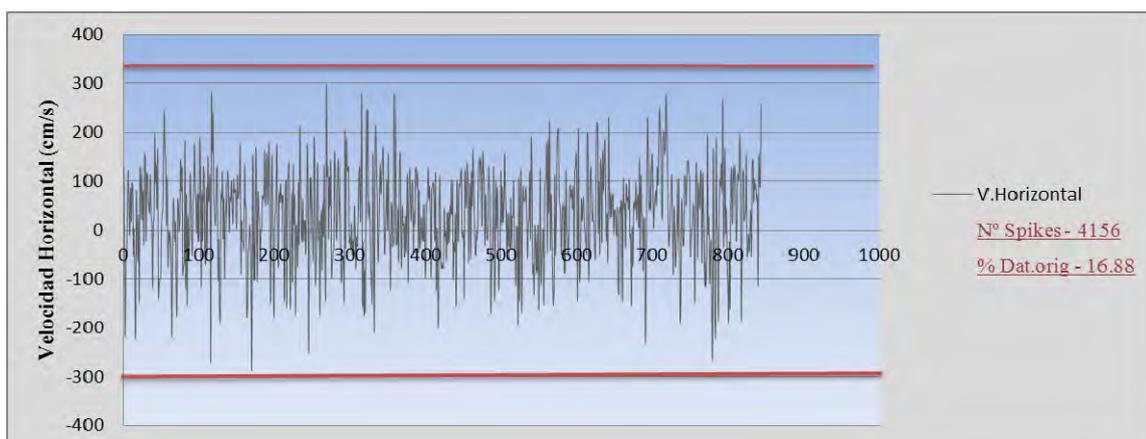


Figura V.11: Serie de datos filtrada con $\lambda=2.5$ y $k=2$.

Conclusiones individuales para los distintos métodos de filtrado utilizados:

- ✓ Al aplicar los valores de umbral de velocidad y aceleración propuestos por Goring y Nikora (2002), se puede ver en la Tabla 4 que los valores de desviación estándar son elevados con respecto a las siguientes pruebas. Además, se aprecia en la gráfica correspondiente que se excluyen muchos datos de la serie original.
- ✓ El valor propuesto por Molina Miñano (2010) consigue disminuir la desviación estándar significativamente con respecto a las pruebas realizadas con los parámetros Goring y Nikora. La velocidad media se reduce poco en relación con la original, sin embargo, se han obtenido un elevado número de spikes, de modo que solo se conserva un 0.34% de los datos de la serie original.
- ✓ En las pruebas realizadas con el umbral de aceleración se observa que la serie filtrada tiende a obtener una desviación reducida conforme se aumenta el valor de umbral aceleración. Sin embargo, obtiene demasiados datos anómalos (spikes), por lo que no se consigue un filtrado adecuado.
- ✓ Incrementos en el parámetro umbral de velocidad dan lugar a que la desviación estándar sea ligeramente inferior a la inicial, mientras que la velocidad es superior a la considerada en la serie. Se conservan más del 90 % de los datos originales. Si disminuimos el umbral de velocidad ya que el método aumenta el número de datos consideramos como anómalos.
- ✓ El método de coeficiente correlación no se ha tenido en cuenta puesto que requiere un coeficiente por debajo del 30%, por tanto no se considera un buen método de filtrado.
- ✓ Para esta serie con turbulencia alta se considera que el método de filtrado más adecuado es el de umbral velocidad, con un parámetro $k=2$.

V.4.2. Filtrado de la serie con turbulencia media.

Para generar un filtro para los datos de turbulencia intermedia se considera el punto en un perfil situado a 40 cm del chorro, a una altura de $y=14.1$ cm dentro de un colchón de agua de $Y=40$ cm (cuatro barreras) generado con un caudal $Q=30.67$ l/s.

Los perfiles de velocidades vertical y horizontal de la sección en cuestión se grafican a continuación:

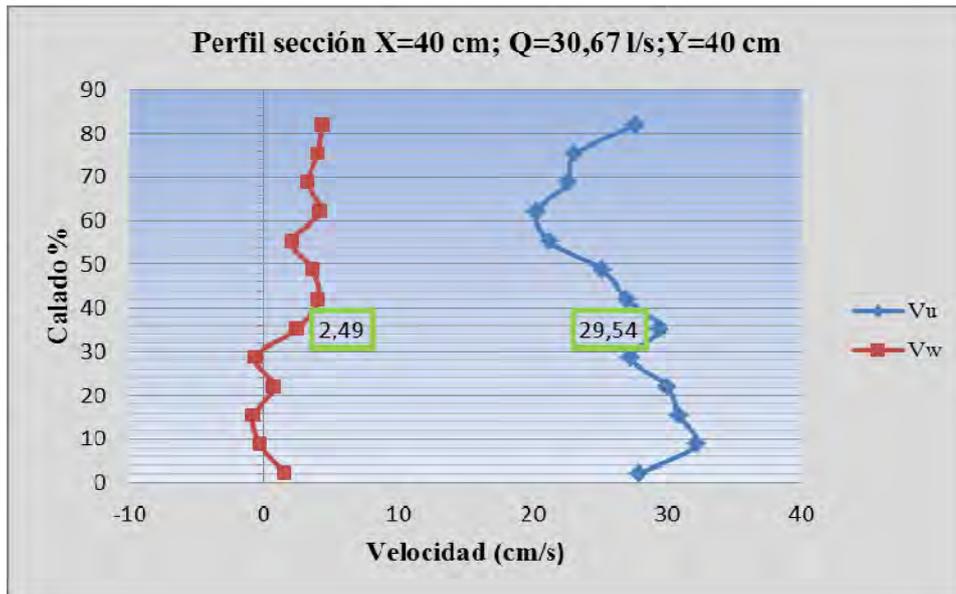


Figura V.12: Perfil de velocidad horizontal y vertical en la sección considerada para el punto de turbulencia media.

Con el fin de obtener el umbral de aceleración del método, se calcula la velocidad media de la sección y el número de Froude :

$$V_{Med} = \frac{0.03067}{1.05 \times 0.4} = 0.073 \text{ m/s} \quad \rightarrow \quad F_r = \frac{0.073}{\sqrt{9.8 \times 0.4}} = 0.0369$$

En el perfil de velocidades no hay un ningún punto en el que se pase de velocidad positiva a negativa, con lo cual el valor de y_j corresponde al calado completo de la sección. De este modo:

$$\lambda_a = \frac{F_r \sqrt{y_j}}{\Delta t \sqrt{g}} = \frac{0.0369 \sqrt{0.4}}{0.1 \sqrt{9.8}} = 0.0745$$

Puesto que $\lambda_a = \frac{F_{rj} \sqrt{y_j}}{\Delta t \sqrt{g}} \geq 0.5 \rightarrow \lambda_a = 0.5$

A continuación se muestra una tabla resumen de las distintas pruebas realizadas a la serie con turbulencia media, con sus correspondientes valores de los parámetros de filtrado y resultados comparados con la serie original:

	Umbral de aceleración λ	Umbral de velocidad K	Coefficiente Correlación (%)	Velocidad (cm/s)	Desviación Típica (cm/s)	Número Spikes	%Datos originales
Serie original				24.94	85.82	0	100
Goring y Nikora	1.4	1.5		13.03	32.22	2054	58.92
Goring y Nikora	1	1.5		10.47	29.80	2686	46.28
Goring y Nikora	1.5	1.5		13.15	32.71	1942	61.16
Molina Miñano	0.5	2.5		3.34	25.92	3632	27.36
			35	5.60	37.53	3362	32.76
		1		16.93	34.06	2238	55.24
		1.5		17.89	38.59	938	81.24
		1.6		17.92	38.79	802	83.96
		1.75		17.77	39.04	657	86.86
		2		17.86	39.65	550	89
⇒		2.25		18.15	40.78	504	89.92
		2.5		19.40	44.32	460	90.8
	1			9.87	30.79	2512	49.76
	1.5			13.12	35.71	1699	66.02
	1.75			14.54	37.05	1444	71.12
	2			15.48	39.00	1250	75.00
	2.25			16.55	40.90	1133	77.34
	2.5			17.61	43.15	1018	79.64
	1.5	2		12.65	32.59	1741	65.18
	1.75	2		14.01	34.03	1491	70.18
	2	2		14.75	35.35	1302	73.96
	2.25	175		15.64	36.36	1259	74.82
	2.25	2		15.42	36.29	1193	76.14
	2.5	2		15.81	36.84	1093	78.14
	2.5	2.5		16.34	38.58	1050	79

Tabla 5: Resultados de los métodos de filtrado para una serie con turbulencia media.

Los resultados gráficos de la aplicación de los distintos métodos de filtrado para el punto de turbulencia media se muestran a continuación:

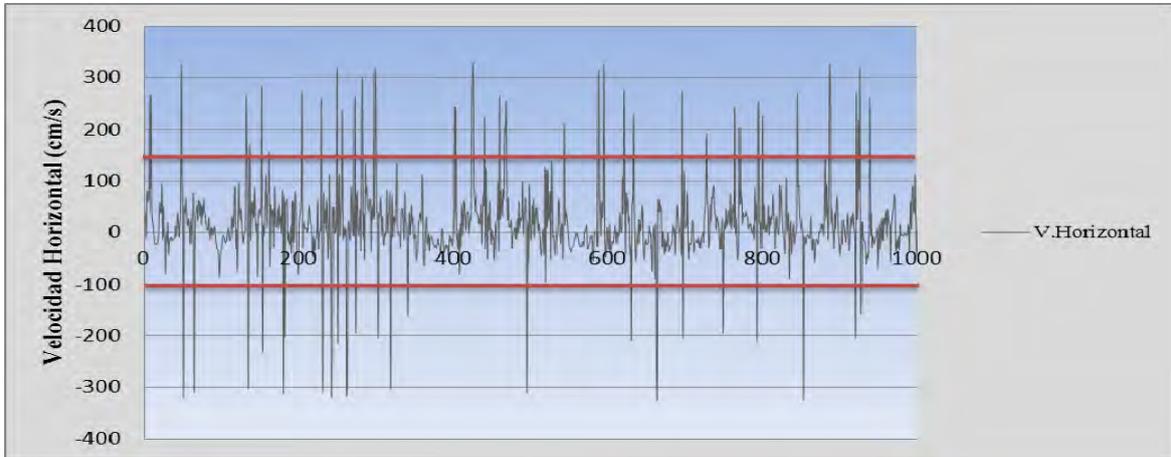


Figura V.13: Serie de datos original, con turbulencia media.

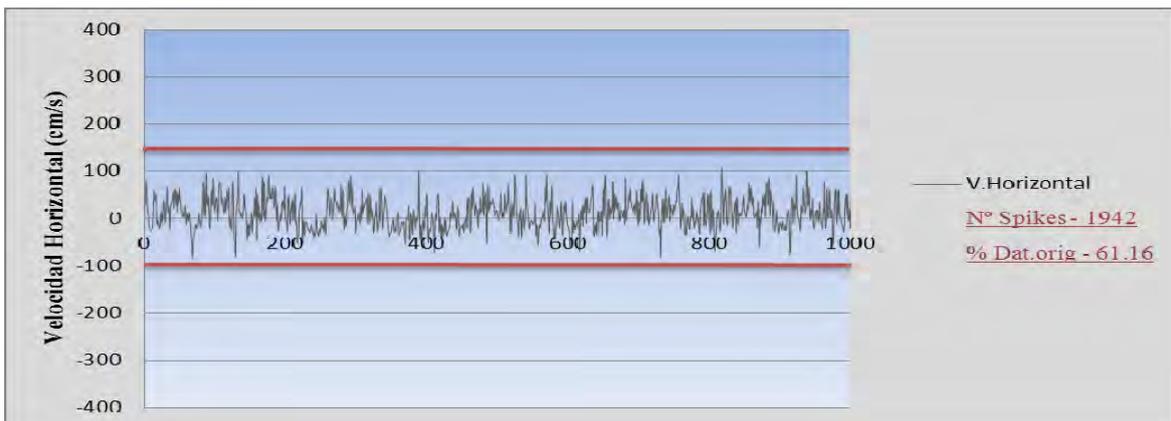


Figura V.14: Serie de datos filtrada con $\lambda=1.5$ y $k=1.5$, Goring y Nikora (2002).

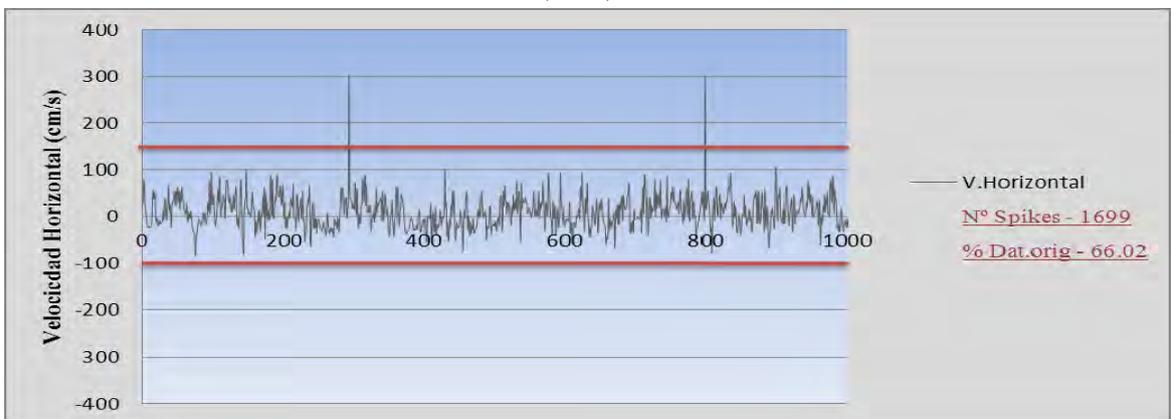


Figura V.15: Serie de datos filtrada con $\lambda=1.5$.

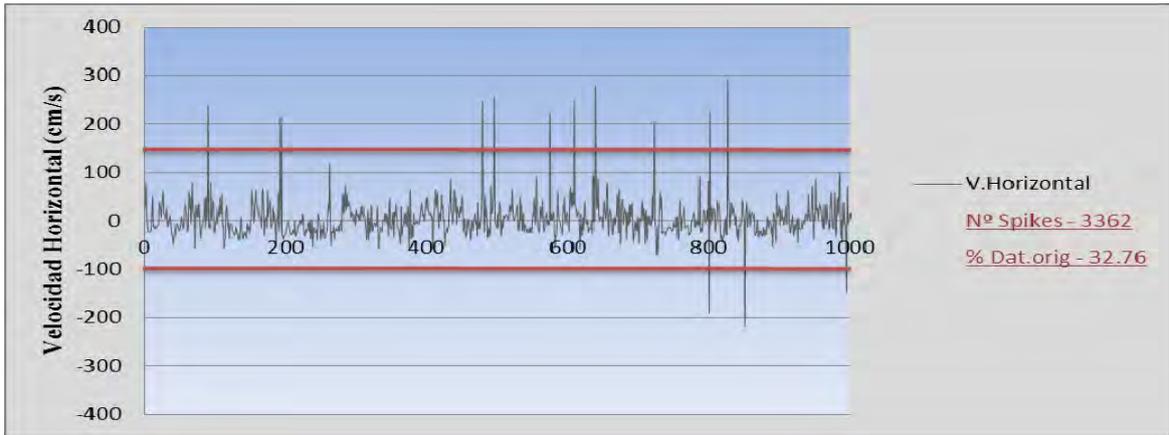


Figura V.16: Serie de datos filtrada con 35%.

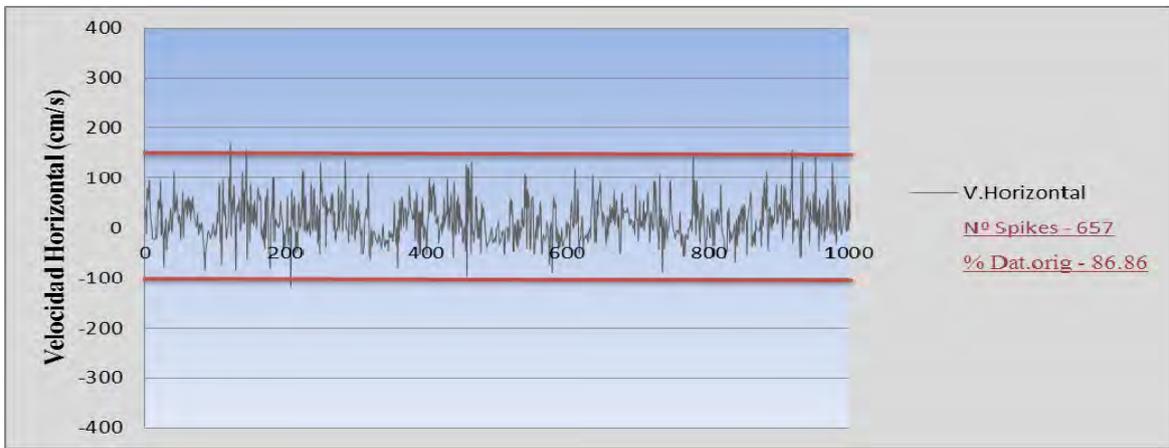


Figura V.17: Serie de datos filtrada con k=1.75.

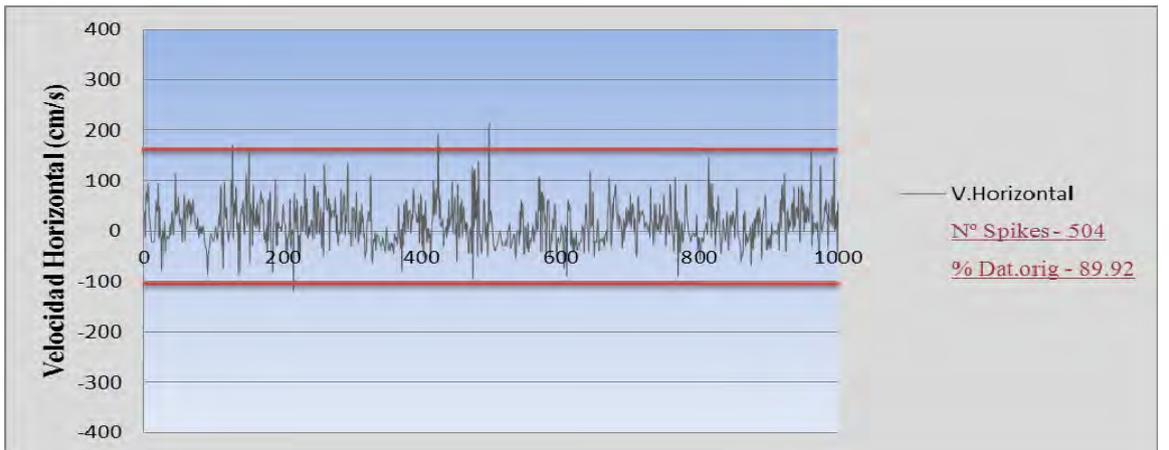


Figura V.18: Serie de datos filtrada con k=2.25.

Conclusiones individuales para los distintos métodos de filtrado utilizados:

- ✓ Al aplicar los parámetros recomendados por Goring y Nikora (2002), la serie consigue valores bajos de desviación en relación con el resto de métodos de filtrado. Sin embargo la serie original sigue viéndose afectada por el gran número de spikes detectados.
- ✓ En el caso de los valores propuestos por Molina Miñano (2010), al disminuir el umbral de aceleración y aumentar el umbral de velocidad se consigue reducir la desviación estándar, pero elimina demasiados datos (spikes).
- ✓ Conforme se aumenta el parámetro umbral de aceleración (Tabla 5), se disminuye el número de spikes, conservando en torno al 80% de la serie original para $\lambda=2.5$. El método umbral de aceleración no es el más adecuado.
- ✓ Al incrementar el umbral de velocidad, vemos que la desviación estándar obtenida disminuye al entorno de la mitad de la desviación inicial y la velocidad es inferior a la inicial. El número de datos considerados como spikes es menor, por lo que se mantiene hasta un 90% de datos originales en la serie.
- ✓ Usar el coeficiente de correlación como método de filtrado conlleva a obtener un mayor número de spikes en relación a los demás métodos de filtrado. La serie se desvirtúa la serie notablemente.
- ✓ Se recomienda utilizar como método de filtrado para la serie de turbulencia media, el umbral de velocidad con un parámetro $k=2.25$. Este método obtiene los mejores resultados y la serie no se vea muy adulterada, al eliminarse un poco más del 10% de los datos originales.

V.4.3. Filtrado de la serie con turbulencia baja.

Para configurar un filtrado para series de turbulencia baja se considera un perfil que se encuentre alejado del punto de impacto del chorro, donde el flujo se va tranquilizando. En concreto el punto situado a $y=3.4$ cm en un colchón de $Y=23.5$ cm en la sección $x=60$ cm obtenido con un caudal de 30.67 l/s.

En la Figura VI.23 se muestran los perfiles de velocidades horizontal y vertical de la sección de estudio $x=60$ cm:

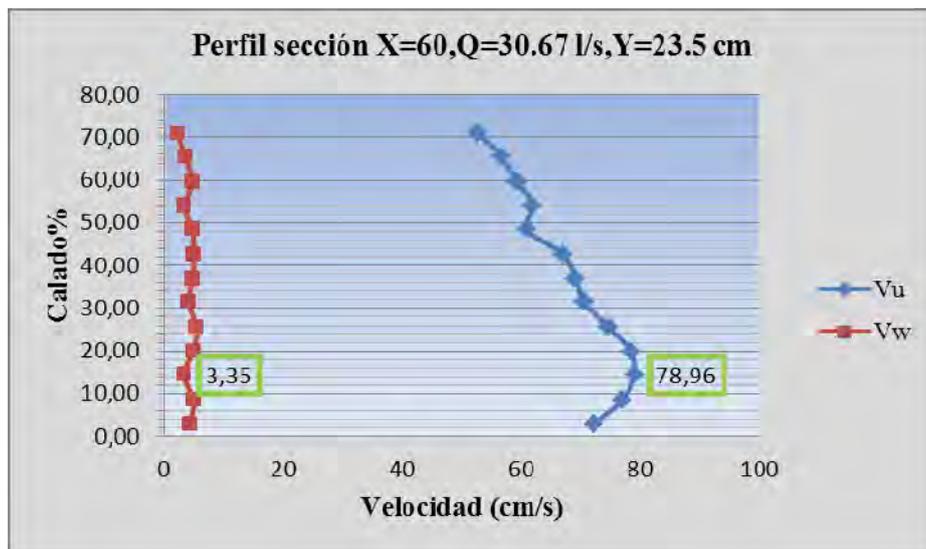


Figura V.19: Perfil de velocidad horizontal y vertical en la sección considerada para el punto de turbulencia baja.

Para obtener el umbral de aceleración se observa el perfil de velocidad horizontal (Figura V.19). No se produce un cambio en el signo de la velocidad, por lo cual el calado total de la sección $Y=23.5$ cm constituye el valor de y_j .

La velocidad media y el número de Froude se obtienen como:

$$V_{Med} = \frac{0.03067}{1.05 \times 0.235} = 0.1243 \text{ m/s} \quad \longrightarrow \quad F_r = \frac{0.1243}{\sqrt{9.8 \times 0.235}} = 0.082$$

El valor del umbral de aceleración λ_a queda:

$$\lambda_a = \frac{F_r \sqrt{y_j}}{\Delta t \sqrt{g}} = \frac{0.082 \sqrt{0.235}}{0.1 \sqrt{9.8}} = 0.127$$

De manera que $\lambda_a = \frac{F_{rj} \sqrt{y_j}}{\Delta t \sqrt{g}} \geq 0.5 \rightarrow \lambda_a = 0.5$

A continuación se recopila una tabla resumen de las distintas pruebas realizadas a la serie con turbulencia baja, con sus correspondientes valores de los parámetros de filtrado y resultados comparados con la serie original:

	Umbral de aceleración λ	Umbral de velocidad K	Coefficiente Correlación (%)	Velocidad (cm/s)	Desviación Típica (cm/s)	Número Spikes	%Datos originales
Serie original				78.96	56.256	0	100
Goring y Nikora	1.15	1.5		77.70	33.34	2086	41.72
Goring y Nikora	1	1.5		77.20	32.69	3268	34.64
Goring y Nikora	1.5	1.5		79.28	34.55	2238	55.24
Molina Miñano	0.5	2.5		72.67	33.18	4473	10.54
			41	47.18	35.38	4643	7.14
			40	50.98	35.59	4553	8.94
		0.7		78.26	21.29	3997	20.06
		1		79.54	28.42	2904	41.92
		1.5		80.39	37.42	1265	74.7
		1.75		80.38	39.79	811	83.78
		2		80.72	41.89	507	89.86
		2.25		80.89	43	318	93.64
		2.5		81.03	43.99	205	95.9
	1			75.99	35.08	3012	39.76
	1.5			78.34	37.59	1738	65.24
	1.75			78.53	38.83	1266	74.68
	2			79.30	40.09	944	81.12
	1.5	2.5		78.45	37.52	1774	64.52
	1.75	1.75		79.10	37.14	1589	68.22
	1.75	2.25		78.68	38.52	1346	73.08
	2	2.25		79.47	39.68	1035	79.30
	1.75	1.75		79.10	37.14	1589	68.22
	2.25	2		79.76	39.88	918	81.64
	2.25	2.5		79.65	40.73	746	85.08

Tabla 6: Resultados de los métodos de filtrado para una serie con turbulencia baja.

Los resultados gráficos de la aplicación de los distintos métodos de filtrado para el punto de turbulencia baja se muestran a continuación:

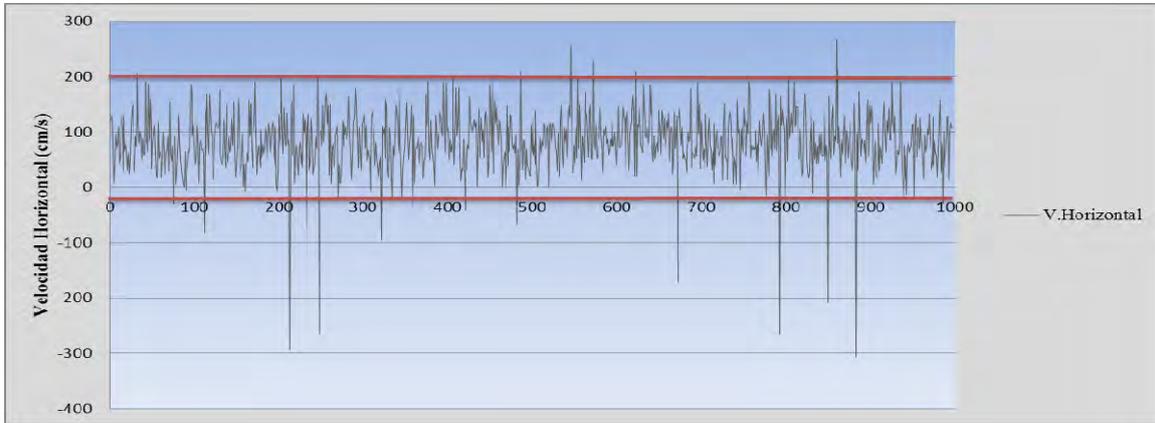


Figura V.20: Serie de datos original, con turbulencia baja.

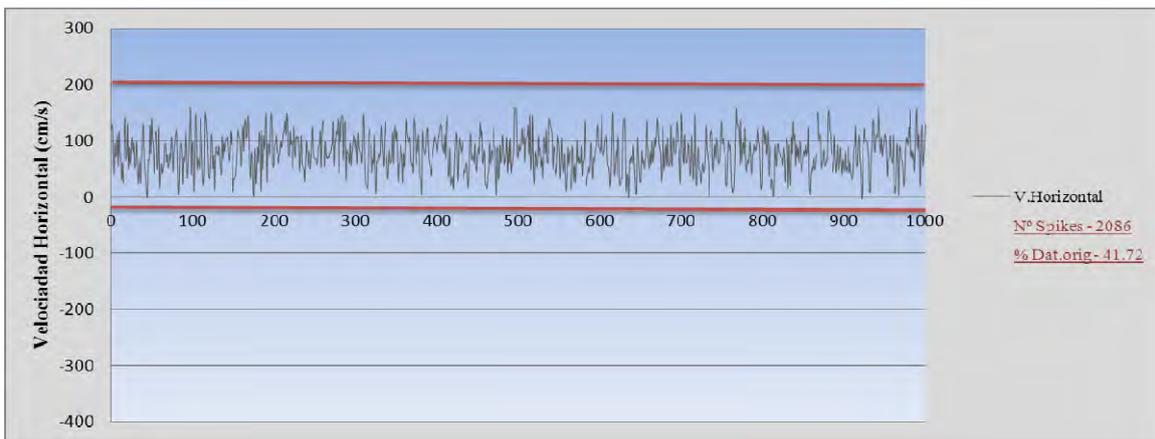


Fig V.21: Serie de datos filtrada con $k=1.5$ y $\lambda=1$, Goring y Nikora (2002).

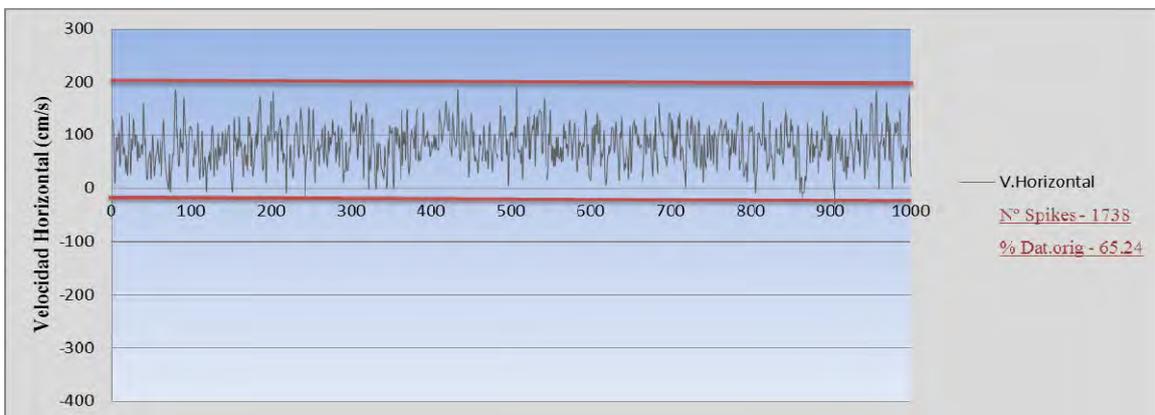


Figura V.22: Serie de datos filtrada con $\lambda=1.5$.

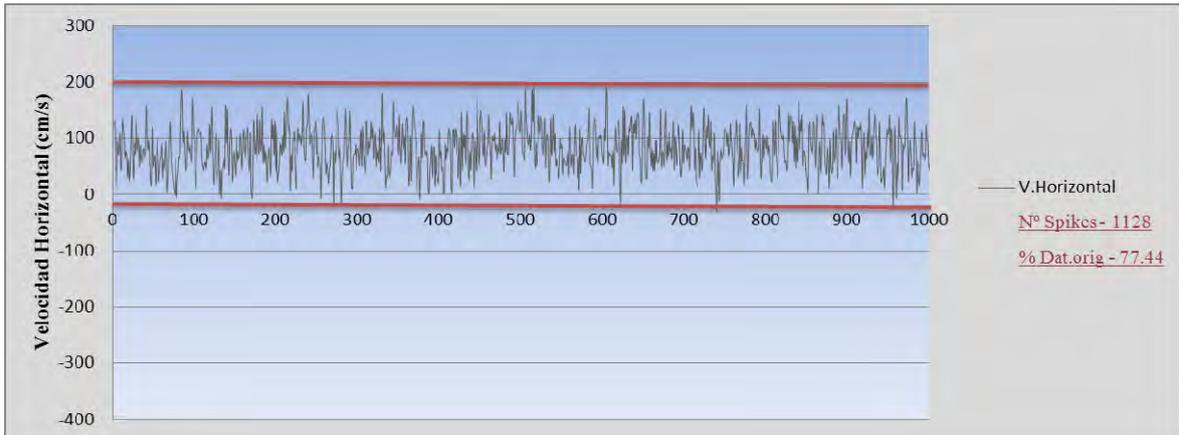


Figura V.23: Serie de datos filtrada con $\lambda=2$ y $k=2$.

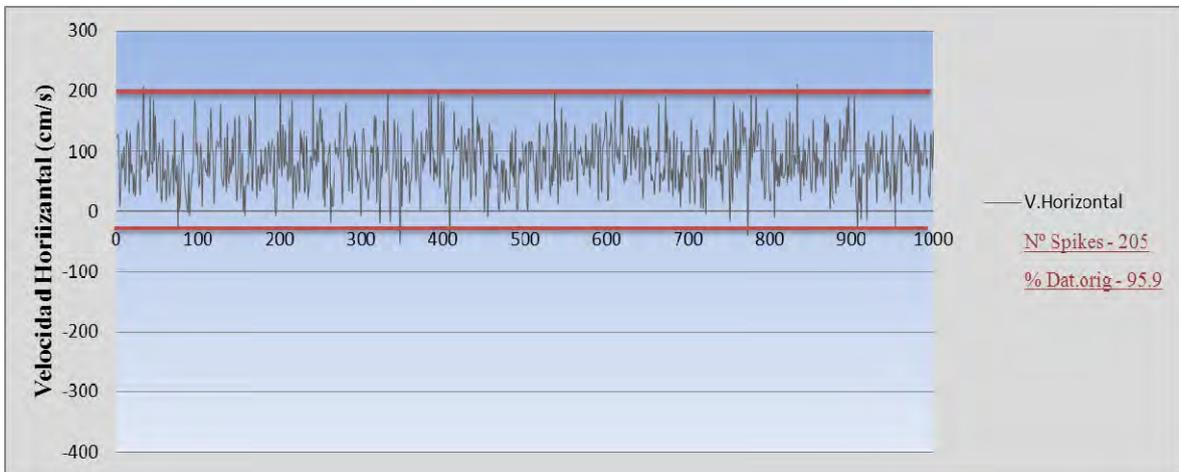


Figura V.24: Serie de datos filtrada con $k=2.5$.

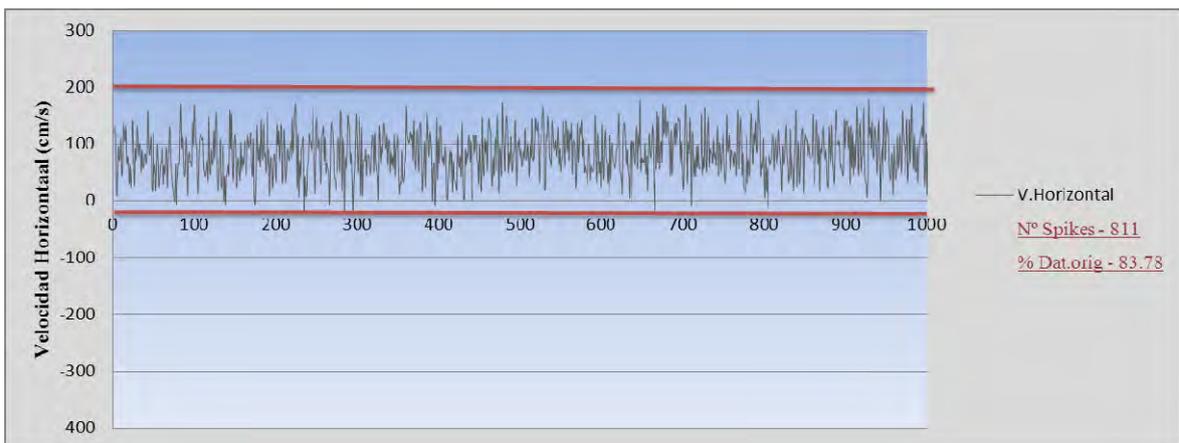


Figura V.25: Serie de datos filtrada con $k=1.75$.

Conclusiones individuales para los distintos métodos de filtrado utilizados:

- ✓ Al aplicar los parámetros fijados por Goring y Nikora (2002) vemos en la tabla 6 que los valores de desviación son más bajos tras el filtro, pero sólo se mantiene el 40-50% de la serie original.
- ✓ Al aplicar los parámetros propuestos por Molina Miñano (2010), se obtienen peores resultados en comparación con Goring y Nikora, dado que el valor del umbral de aceleración es bastante restrictivo.
- ✓ Al usar parámetros de umbral de velocidad por encima de $k=2$, la desviación estándar se reduce. Mientras que la cantidad de datos se mantiene en torno a un 96%.
- ✓ El filtrado con valores de umbral de aceleración bajos, provoca que la serie llegue a deformarse al eliminar muchos datos tomados como anómalos. Al usar parámetros mayores a $\lambda=1.5$ no hay mucha diferencia en el valor de la desviación siendo del mismo orden.
- ✓ Con el método de la correlación la gran mayoría de datos son spikes, disminuyendo también la desviación. No se considera un método con el cual se obtengan buenos resultados.
- ✓ El método de filtrado apropiado para la serie de turbulencia baja, será el de umbral de velocidad con un parámetro $k=2.5$ ya que en comparación con el resto de métodos de filtrado se consigue un 95.9% de datos originales en la serie.

V.5. CONCLUSIÓN FILTRADO.

Tras aplicar los diferentes métodos recomendados por los autores a cada una de las series con su diferente turbulencia, llegamos a establecer la conclusión final de filtrado:

- ✓ El método fijado por Goring y Nikora (2002), adultera las series al mantener entre el 40 y 50 % de datos originales.
- ✓ Al aplicar los parámetros propuestos por Molina Miñano (2010) se produce una disminución considerable del número de datos superior que aplicar Goring y Nikora.
- ✓ El parámetro umbral de aceleración λ_a , produce buenos resultados al mantener entre un 70 y 80 % de los datos originales en series con poca turbulencia. Por el contrario no responde bien ante series con una desviación inicial muy grande, al conservar menos de un 20% de la serie de registro inicial con valores de λ entre 1 y 2.5.
- ✓ El proceso de filtro con el coeficiente de correlación presenta en todas la series una elevada cantidad de spikes, no se considera un método de filtrado con el cual se obtengan buenos resultados.

El filtro que mejores soluciones propone es de umbral de velocidad, el cual consigue eliminar los puntos anómalos que se encuentran fuera de la franja establecida como ayuda para la visualización, dando lugar a que no se alteren significativamente las series. Guiados por este criterio y con el objetivo de obtener resultados óptimos se ha considerado adecuado emplear el siguiente método de filtrado:

Desviación estándar del registro	Parámetro umbral de velocidad
Si $\sigma \geq 70$	k =2
Si $\sigma < 70$	k =2.5

Tabla 7: Elección de Método de Filtrado

VI. Campaña de muestreo.

La campaña de laboratorio consiste en la toma de datos de velocidades instantáneas en el cuenco de disipación aguas abajo del impacto de un chorro de vertido libre, obtenidas mediante equipo Acoustic Doppler Velocimeter (ADV). Se han marcado distintas secciones transversales en el cuenco de amortiguación para los diferentes caudales y colchones dentro del cuenco.

En cada sección se analizaron 6 colchones de agua, cada uno de ellos conseguidos apilando sucesivas barreras metálicas aguas abajo del cuenco (Figura VI.1).

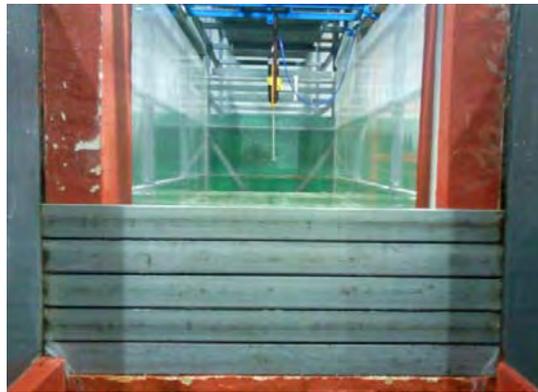


Figura VI.1: Detalle de 5 barreras a la salida del cuenco.

Se han analizado resaltos producidos por 3 caudales de ensayo:

Caudal de ensayo		Perfiles	Nº Barreras
Inferior	19.58 l/s	De X= 10 a X = 60	6
Medio	30.67 l/s	De X= 10 a X = 70	6
Superior	45.31 l/s	De X= 10 a X = 70	6

Tabla 8: Distribución de perfiles en la campaña de laboratorio.

Para la correcta caracterización de la velocidad del flujo en el cuenco de disipación, las secciones transversales se han espaciado cada 10 cm (líneas negras Figura VI.2), teniendo como origen la zona de impacto directo del chorro (línea azul Figura VI.2).

0cm 10cm 20cm 30cm 40cm 50cm 60cm 70cm



Figura VI.2: Distribución de secciones de estudio en el cuenco de amortiguación.

Una vez definida la distribución de las secciones de estudio, se realiza la medición de velocidades instantáneas para cada caudal, situando la sonda en esas localizaciones.

La separación entre los puntos de cada perfil depende del calado del colchón de agua formado dentro del cuenco de disipación así como de su distancia al chorro.

Las separaciones verticales de los puntos de muestreo se recogen en la siguiente tabla:

Paso	0.67cm	Perfiles	Barreras	Separación vertical entre puntos		Colchón de agua (Y).
Frecuencia	10 Hz					
Registro	5000 Datos					
Q=45.31 l/s Superior	de x=10cm a x=70cm	B1 y B2	De 0 a 4cm Cada 0.67 cm	Resto cada 1.33cm	15 cm	
					25 cm	
		B3 y B4	De 0 a 7cm Cada 1.33 cm	Resto cada 2.66cm	33.5 cm	
					43 cm	
		B5 y B6	De 0 a 8cm Cada 2 cm	Resto cada 4cm	52 cm	
					64 cm	
Q=30.67 l/s Medio	de x=10cm a x=70cm	B1 y B2	De 0 a 4cm Cada 0.67 cm	Resto cada 1.33cm	15 cm	
					23.5 cm	
		B3 y B4	De 0 a 7cm Cada 1.33 cm	Resto cada 2.66cm	32 cm	
					40 cm	
		B5 y B6	De 0 a 8cm Cada 2 cm	Resto cada 4cm	48.5 cm	
					57 cm	
Q=19.58 l/s Inferior	de x=10cm a x=60cm	B1 y B2	De 0 a 4cm Cada 0.67 cm	Resto cada 1.33cm	12.5 cm	
					21.5 cm	
		B3 y B4	De 0 a 7cm Cada 1.33 cm	Resto cada 2.66cm	30 cm	
					38.5 cm	
		B5 y B6	De 0 a 8cm Cada 2 cm	Resto cada 4cm	46.5 cm	
					55 cm	

Tabla 9: Datos para la realización de la campaña de muestro.

En un proyecto anterior se observó la necesidad de medir más puntos que se producen en los perfiles verticales cercanos a la zona de impacto con el fin de intentar capturar el chorro de pared en el fondo.

A partir de los datos de velocidad registrados según la guía establecida en Tabla 9, se grafica los perfiles de velocidad para cada sección (Figura VI.3).

En la Figura VI.3 se observa un ejemplo de la distribución de velocidades horizontales obtenida a 30 cm del punto de impacto:

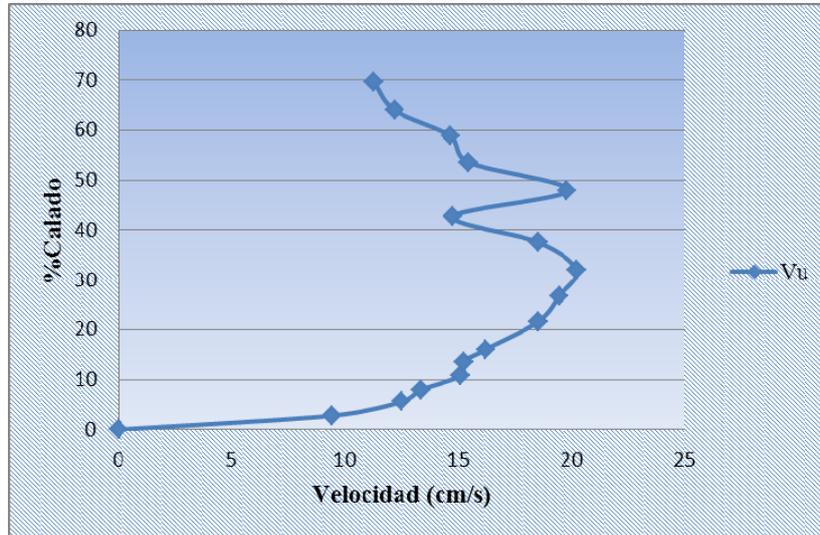


Figura VI.3: Perfil de velocidad horizontal para la sección X=30 cm con un caudal de 45.31 l/s y un colchón de 25 cm.

VI.1. ANALISIS RESULTADOS GRAFICOS.

En apartados anteriores se ha llevado a cabo un análisis inicial sobre unas series de referencia para analizar el comportamiento de estas frente a la aplicación de diversos métodos de filtrado. En este apartado se realiza un estudio global de los 3 caudales, siguiendo como guía el criterio de filtrado elegido. De este modo se obtienen velocidades medias y turbulentas en las tres direcciones a partir de las cuales se estima la intensidad de turbulencia generada en el cuenco de amortiguación por el resalto hidráulico y la energía cinética turbulenta. Todos estos datos permiten analizar cómo actúa el fluido bifásico dentro del cuenco.

A continuación se estudiará la evolución de las velocidades medias en los diferentes perfiles, así como de la energía cinética (TKE) e intensidad turbulenta por cada caudal y colchón analizado.

VI.1.1. Caudal Q=19.58 l/s

La intensidad turbulenta T_u se calcula a partir de los datos registrados en el Anexo I como:

$$T_u = v' / U_m \quad (6.1)$$

Especificación:

$U_m \approx$ Velocidad media.

$v' \approx$ Raíz cuadrática media de la fluctuación de velocidad turbulenta .

Se ha calculado la relación existente entre las velocidades turbulentas mediante:

$$v' / u' \quad ; \quad w' / u'$$

Aclaremos que:

$u' \approx$ Raíz cuadrática media de la fluctuación de velocidad turbulenta en el plano horizontal.

$w' \approx$ Raíz cuadrática media de la fluctuación de velocidad turbulenta en el plano vertical.

La Energía Cinética Turbulenta (m^2/s^2) se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$TKE = \frac{1}{2} (u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (6.2)$$

Colchón Y=12.5 cm

En la Figura VI.4 se puede apreciar la distribución de velocidades horizontales y verticales, en las diferentes secciones de estudio, logradas con un colchón de Y=12.5 cm.

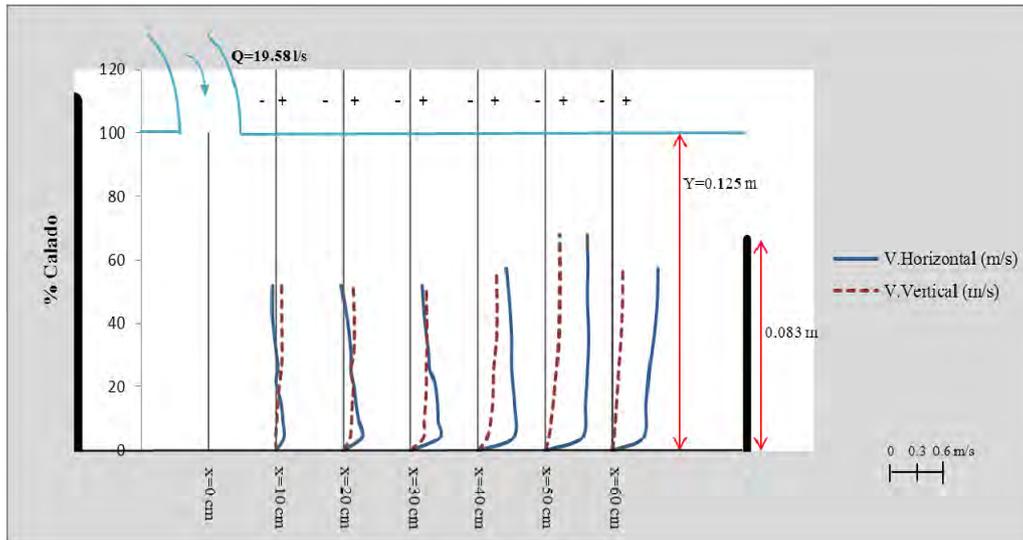


Figura VI.4: Perfiles de velocidad cada 10 cm desde el punto de impacto del chorro, para un caudal de 19.58 l/s e Y=12.5m.

Para la figura VI.4 con su correspondiente colchón de agua se puede apreciar una distribución de velocidades guiada por valores positivos y negativos en los tres primeros perfiles alcanzándose un máximo de velocidad horizontal en la zona cercana a la solera. Conforme los perfiles se encuentran cercanos a la contrapesa vemos como adquieren una tendencia variada en cuanto a las velocidades, propia del comportamiento del flujo en canales.

En la Figura VI.5 se grafica la tendencia de las velocidades medias horizontales.

Se puede apreciar que los tres primeros perfiles de velocidad horizontal, el flujo sufre un retroceso en la parte superior. En los perfiles más alejados de la zona de impacto, desaparece la influencia del chorro debido a que la longitud del resalto sumergido es suficiente para alcanzar una distribución de velocidades de flujo gradualmente variado.

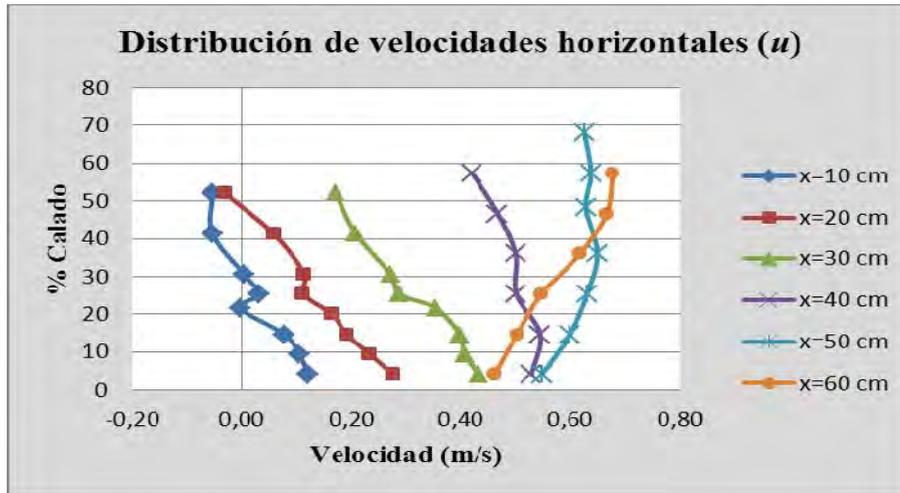


Figura VI.5: Distribución de velocidades medias horizontales dentro del colchón de agua $Q=19.58$ l/s; $Y=12.5$ m.

Como se observa en la Figura VI.5 en los perfiles más cercanos al chorro de pared no se ha conseguido capturar el chorro de pared. Registrándose un máximo para la velocidad horizontal de 0.66 m/s sobre todo para los perfiles más alejados de la zona de impacto directo, debido a un mayor transporte del fluido agitado hacia dichas zonas.

En la Figura VI.6 se grafica la tendencia de las velocidades medias verticales.

Los perfiles de velocidad media vertical tienden a variar poco dentro del cuenco, presentando un valor mínimo en el fondo además de que tienden aumentar hacia la superficie.

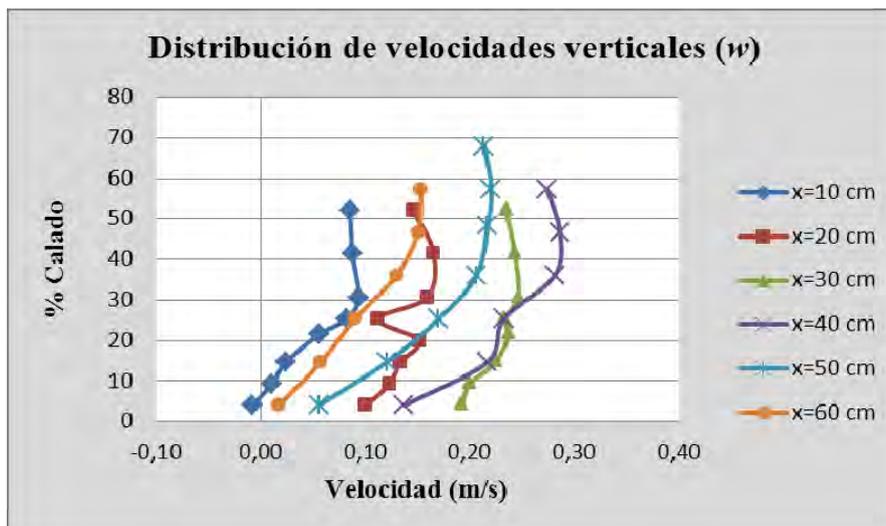


Figura VI.6: Distribución de velocidades medias verticales dentro del colchón de agua $Q=19.58$ l/s; $Y=12.5$ m

En la Figura VI.7 se grafica la velocidad turbulenta horizontal para las distintas secciones de estudio.

Los perfiles más cercanos a la zona de impacto del chorro experimentan una disminución en cuanto a la velocidad turbulenta horizontal cuando se separan de la solera, mientras que los perfiles más alejados tienden a aumentar. Cerca de la superficie, los perfiles tienden a un valor de 0.4 m/s.

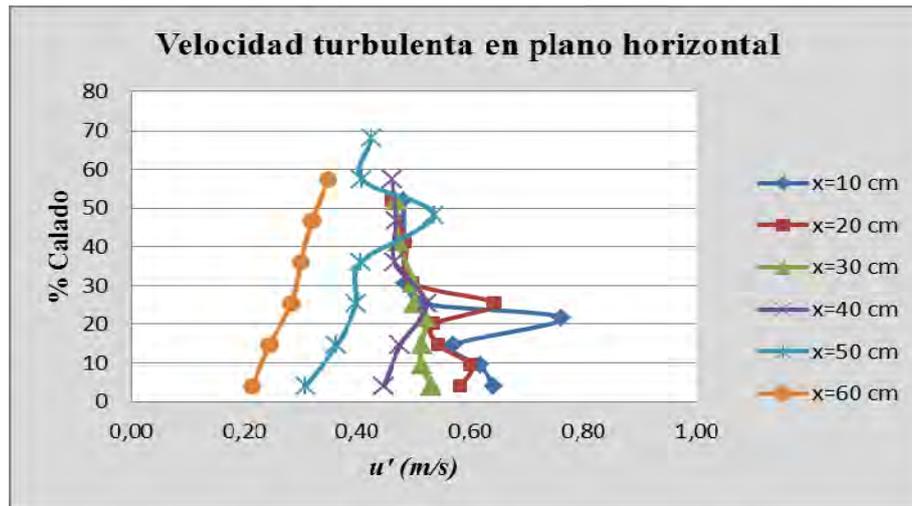


Figura VI.7: Velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con Q=19.58 l/s; Y= 12.5 cm.

En la Figura VI.8 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano transversal y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 12.5 cm.

Como se ve los valores de la velocidad turbulenta transversal son muy similares a la velocidad turbulenta horizontal. De este modo la relación v'/u' se encuentra entre 0.90 y 1.10.

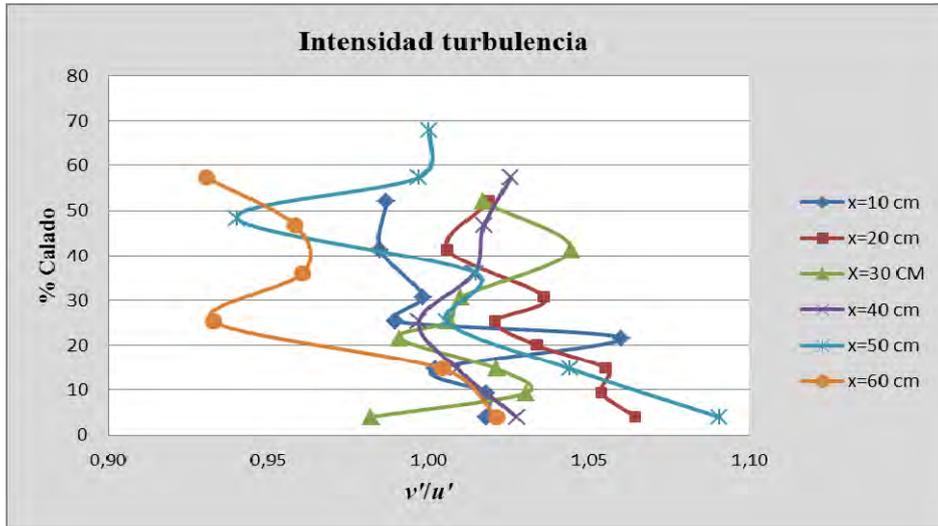


Figura VI.8: Relación entre la velocidad turbulenta transversal y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=19.58$ l/s; $Y=12.5$ cm.

En la Figura VI.9 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano vertical y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 12.5 cm.

Podemos ver que las velocidades turbulentas verticales están en el orden de un 30 % de la velocidad turbulenta horizontal.

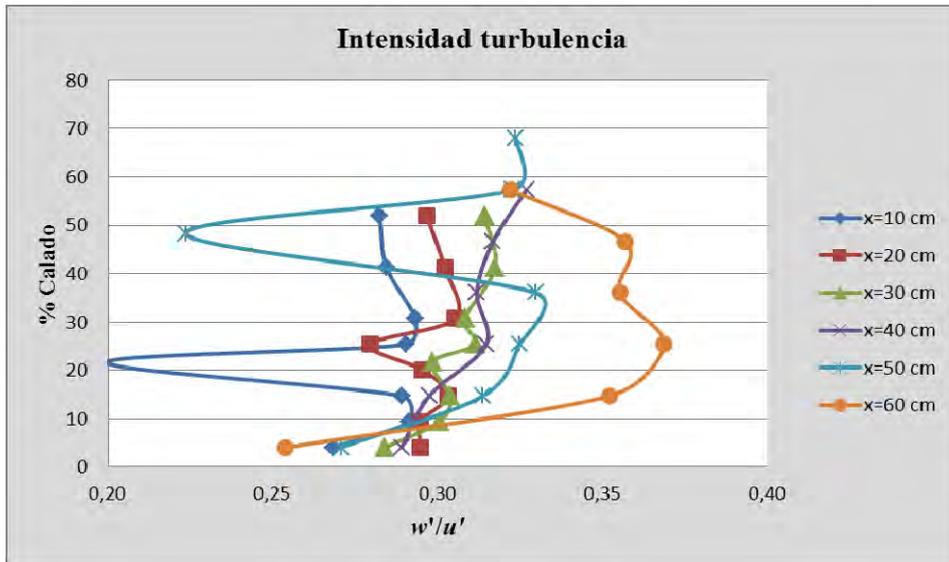


Figura VI.9: Relación entre la velocidad turbulenta vertical y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=19.58$ l/s; $Y=12.5$ cm.

La Figura VI.10 muestra los valores de los perfiles de la energía cinética turbulenta referentes a las distintas secciones de estudio.

Se observa que la energía cinética, en los perfiles más cercanos al chorro es mayor, debido al intenso movimiento de recirculación que se genera. Conforme nos alejamos del chorro la energía cinética disminuye gracias a la disipación de energía que se ha producido en el resalto sumergido.

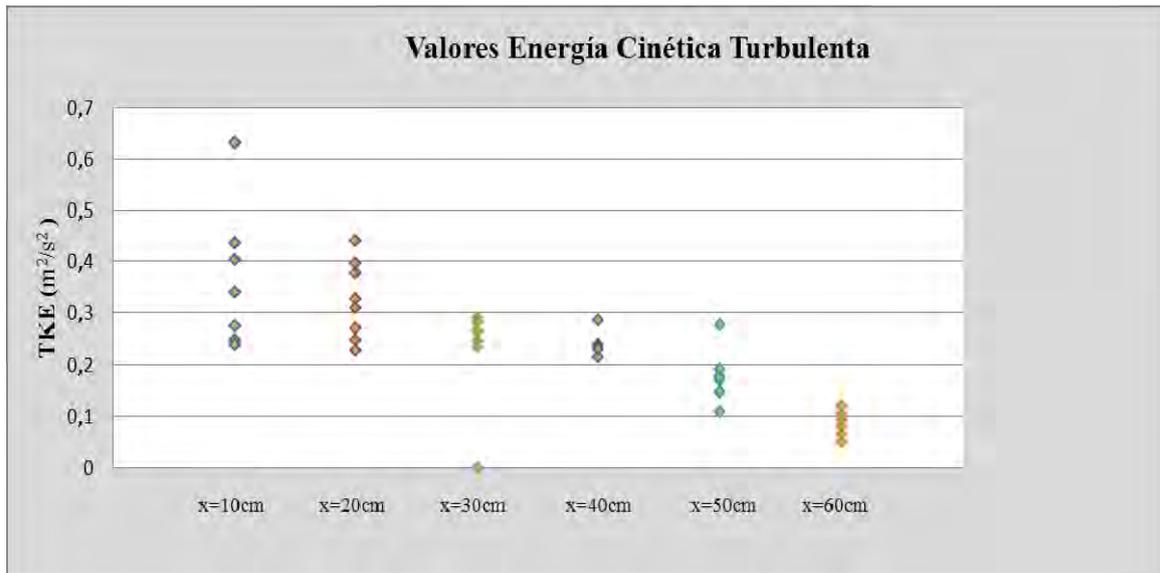


Figura VI.10: Desarrollo de la energía cinética turbulenta para $Q=19.58\text{ l/s}$; $Y=12.5\text{cm}$.

La Figura VI.11 muestra la evolución de la energía cinética turbulenta en los diferentes perfiles a lo largo del cuenco de amortiguación.

La máxima energía cinética turbulenta se alcanza el perfil más cercano a la zona de impacto del chorro, siendo por tanto la zona de mayor turbulencia. A partir de esta sección, se ve como la energía es disipada parcialmente, hasta llegar al perfil más alejado en el cual se registran valores bajos de energía cinética turbulenta.

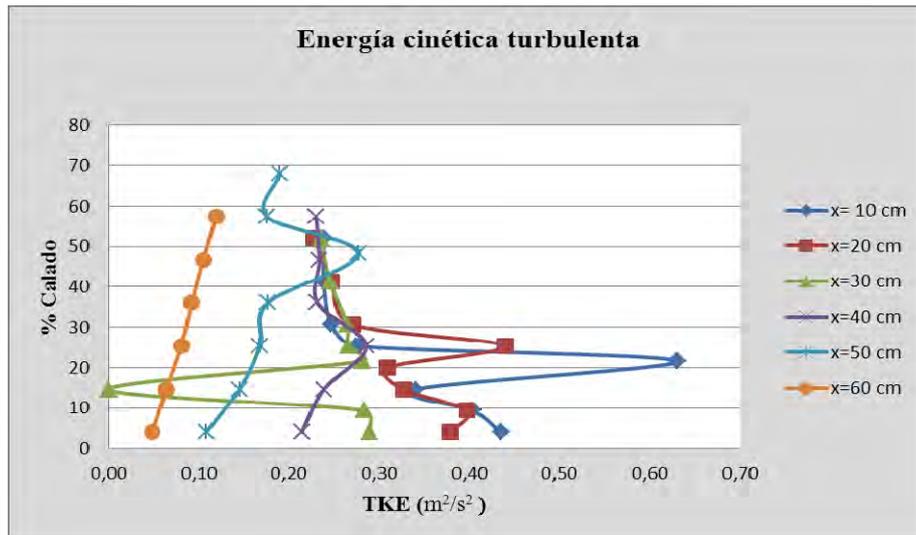


Figura VI.11: Perfiles de energía cinética turbulenta en el cuenco, para $Q=19.58$ l/s; $Y=12.5$ cm.

Colchón $Y=21.5$ cm.

En la Figura VI.12 se puede apreciar la distribución de velocidades horizontales y verticales en las diferentes secciones de estudio, logradas con un colchón de $Y=21.5$ cm.

Para el colchón de 40 cm se han medido los primeros 60 cm desde el punto de impacto del chorro. Los efectos producidos en la distribución de velocidades por el resalto sumergido se aprecian para los primeros perfiles.

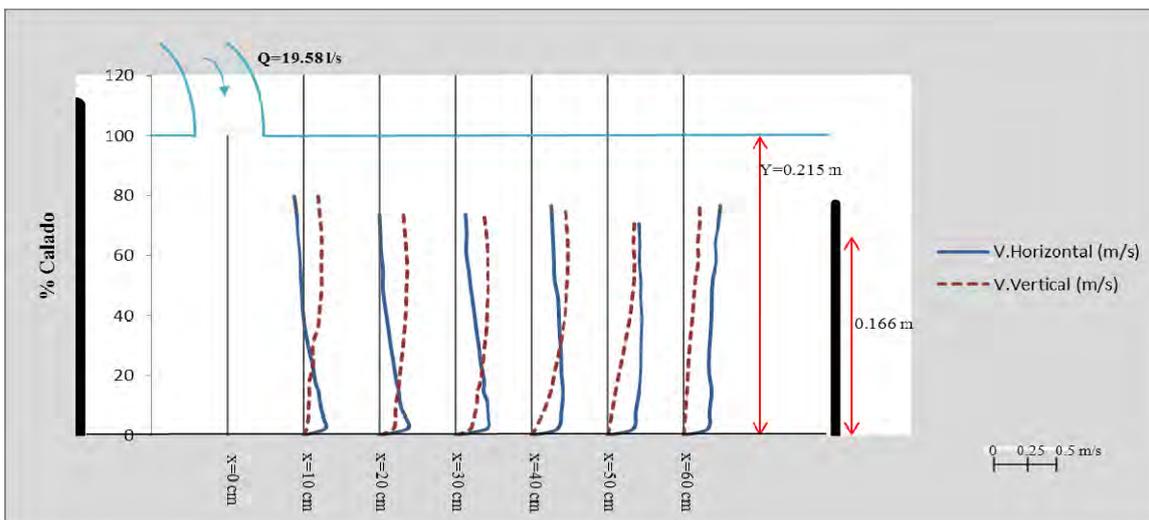


Figura VI.12: Perfiles de velocidad cada 10 cm desde el punto de impacto del chorro, para un caudal de 19.58 l/s e $Y=21.5$ cm.

En la Figura VI.13 se grafica la tendencia de las velocidades medias horizontales.

Para las primeras secciones se observa el fenómeno del chorro de fondo (se obtiene un pico de velocidad en la zona próxima a la solera), mientras que el flujo cerca de la lámina libre tiende a velocidades incluso negativas debido a la recirculación. En las secciones más alejadas el efecto del chorro de pared ha desaparecido y las velocidades tienden a adquirir el perfil de flujo gradualmente variado.

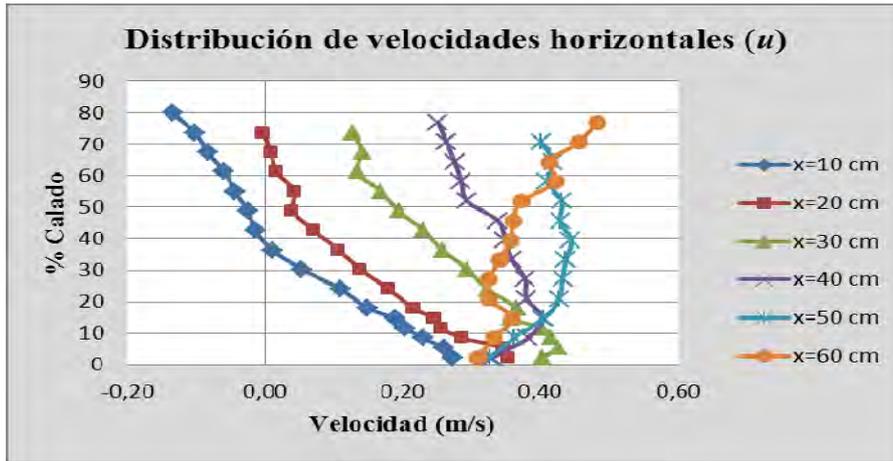


Figura VI.13: Distribución de velocidades medias horizontales dentro del colchón de agua para $Q=19.58$ l/s; $Y=21.5$ cm.

En la Figura VI.14 se grafica la tendencia de las velocidades medias verticales.

La mayoría de los perfiles tienen una tendencia parecida, con incrementos de velocidad vertical hacia la superficie.

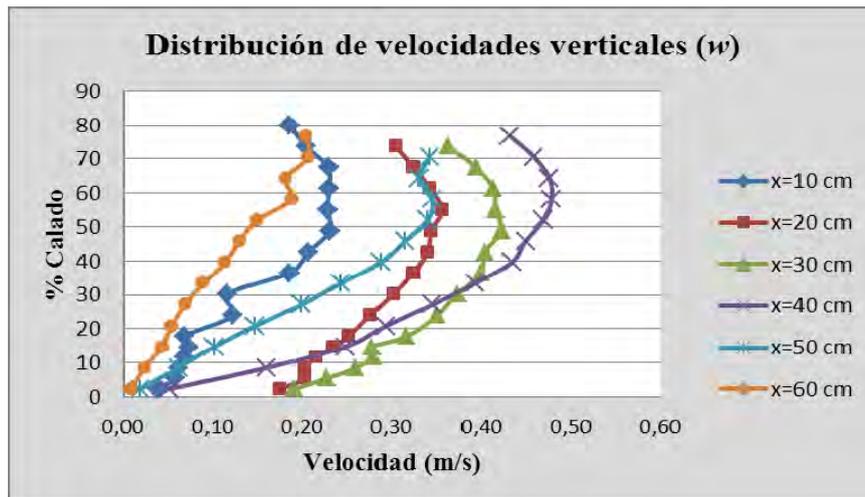


Figura VI.14: Distribución de velocidades medias verticales dentro del colchón de agua $Q=19.58$ l/s; $Y=21.5$ cm.

En la Figura VI.15 se grafica la velocidad turbulenta horizontal para las distintas secciones de estudio.

Distinguimos dos grupos en los que existe un desarrollo desde el fondo hacia la superficie con valores en torno a 0.20 m/s y 0.60 m/s. Aun así se aprecia para los últimos perfiles como la velocidad disminuye conforme se alejan de la sección de mayor turbulencia.

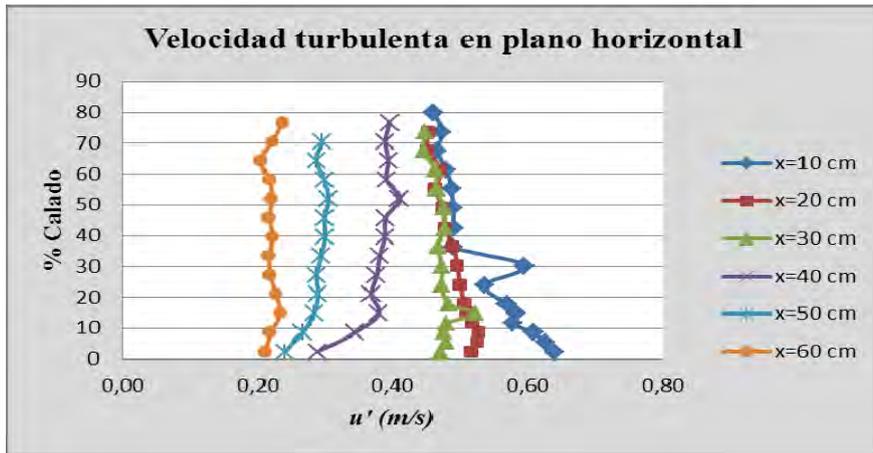


Figura VI.15: Velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=19.58$ l/s; $Y= 21.5$ cm.

En la Figura VI.16, se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano transversal y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 21.5 cm.

Los valores de velocidad turbulenta horizontal y transversal en los perfiles es muy similar, estando acotada la relación v'/u' entre un mínimo de 0.95 y un valor máximo de 1.10.

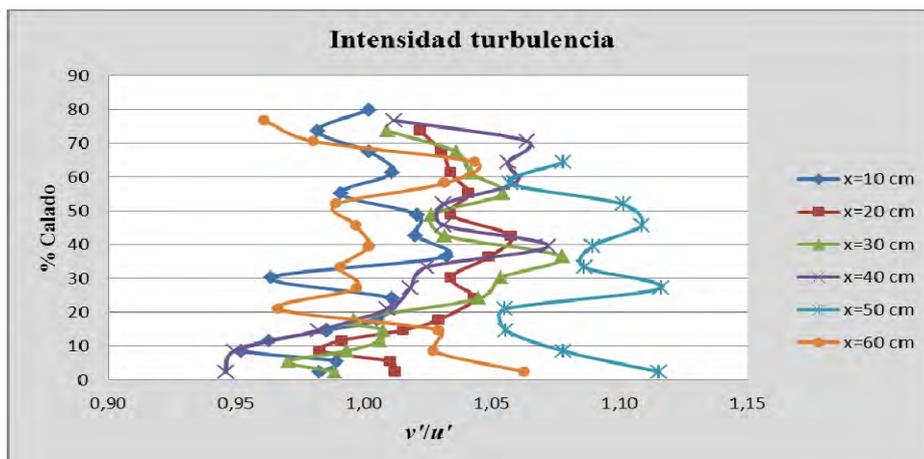


Figura VI.16: Relación entre la velocidad turbulenta transversal y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=19.58$ l/s; $Y= 21.5$ cm.

En la Figura VI.17 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano vertical y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 21.5 cm.

Los perfiles siguen dos tendencias. Los tres perfiles más alejados del chorro parten desde el fondo con valor de 0.3 y tienden a aumentar al distanciarse del fondo. Por otro lado los perfiles más próximos a la zona de impacto evolucionan hacia la superficie con valores en torno a 0.3 en toda la columna de agua.

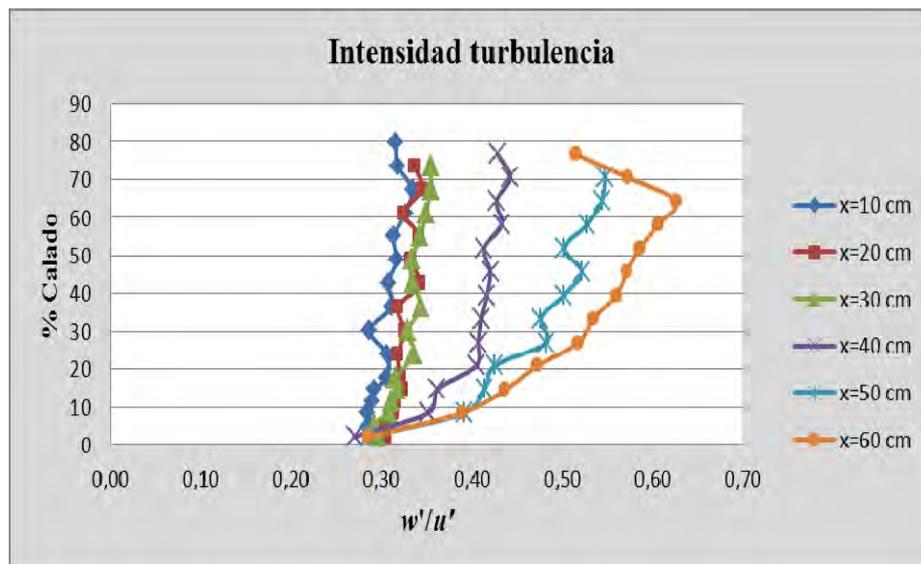


Figura VI.17: Relación entre la velocidad turbulenta vertical y la horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=19.58$ l/s; $Y= 12.5$ cm.

La Figura VI.18, muestra los valores de la energía cinética turbulenta referentes a las distintas secciones de estudio.

Se observa un incremento de la energía cinética al encontrarnos a 10 cm de la zona de mayor turbulencia, por lo que observamos la disipación de energía se produce en la región entre 30 y 60 cm aguas abajo del punto de incidencia del chorro.

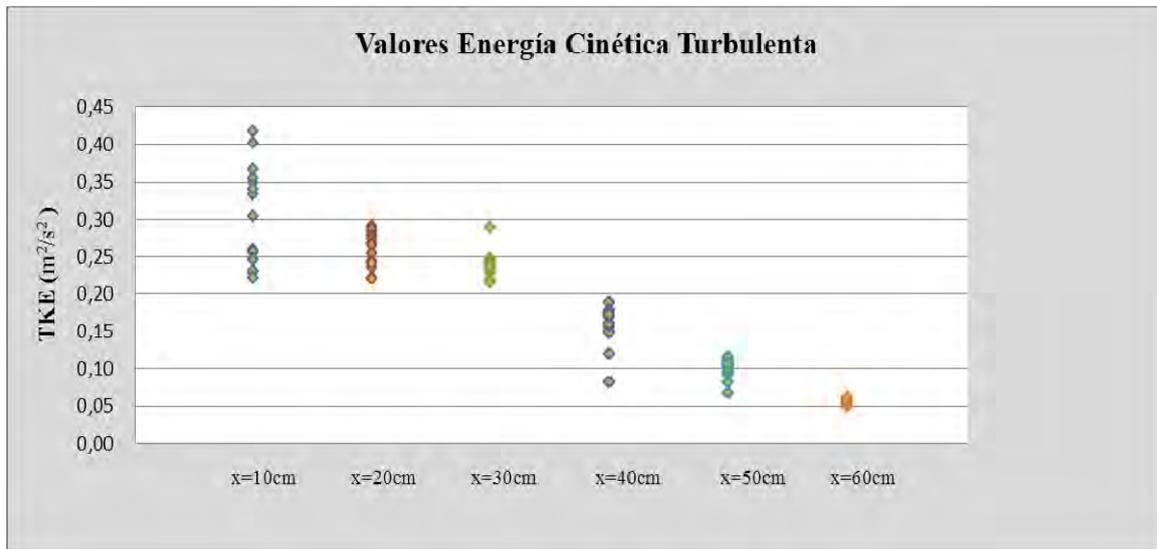


Figura VI.18: Desarrollo de la energía cinética turbulenta para $Q=19.58$ l/s; $Y=21.5$ cm.

La Figura VI.19, muestra la evolución de la energía cinética turbulenta en los diferentes perfiles a lo largo del cuenco de amortiguación.

Se observa que a 10 cm de la zona de impacto directo el movimiento turbulento se separa de la solera y tiende a generar una gran producción de energía cinética turbulenta. Respecto a la disipación de energía comienza gradualmente a partir de $x=30$ cm en adelante.

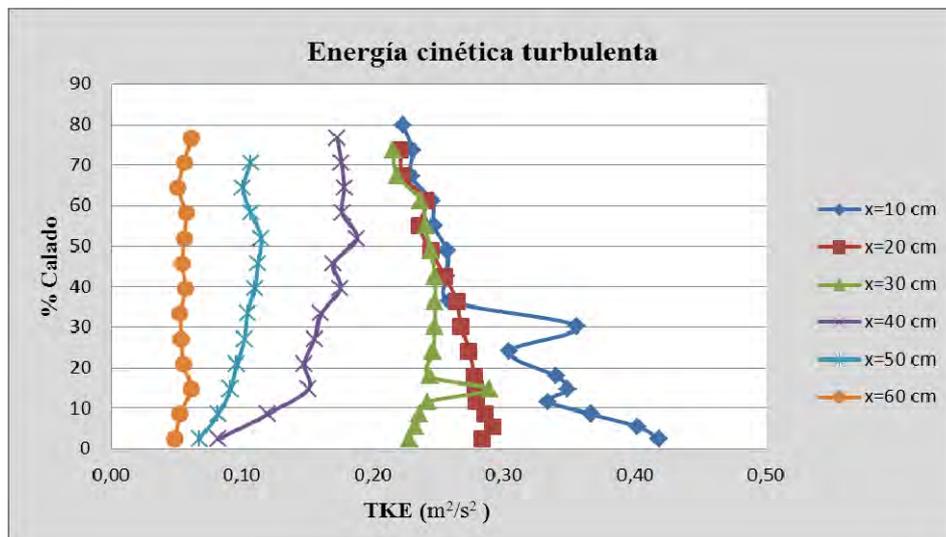


Figura VI.19: Perfiles de energía cinética turbulenta en el cuenco, para $Q=19.58$ l/s $Y=21.5$ cm.

Colchón Y=30 cm.

En la Figura VI.20 se puede apreciar la distribución de velocidades horizontales y verticales en las diferentes secciones de estudio, logradas con un colchón de Y=30 cm.

Vemos que el chorro de fondo se encuentra desarrollado para los primeros perfiles. A lo largo del cuenco la distribución de velocidad horizontal va adquiriendo valores positivos debido a que se acentúan las perturbaciones producidas por el resalto hacia la superficie sin embargo la distribución de velocidad vertical pierde intensidad.

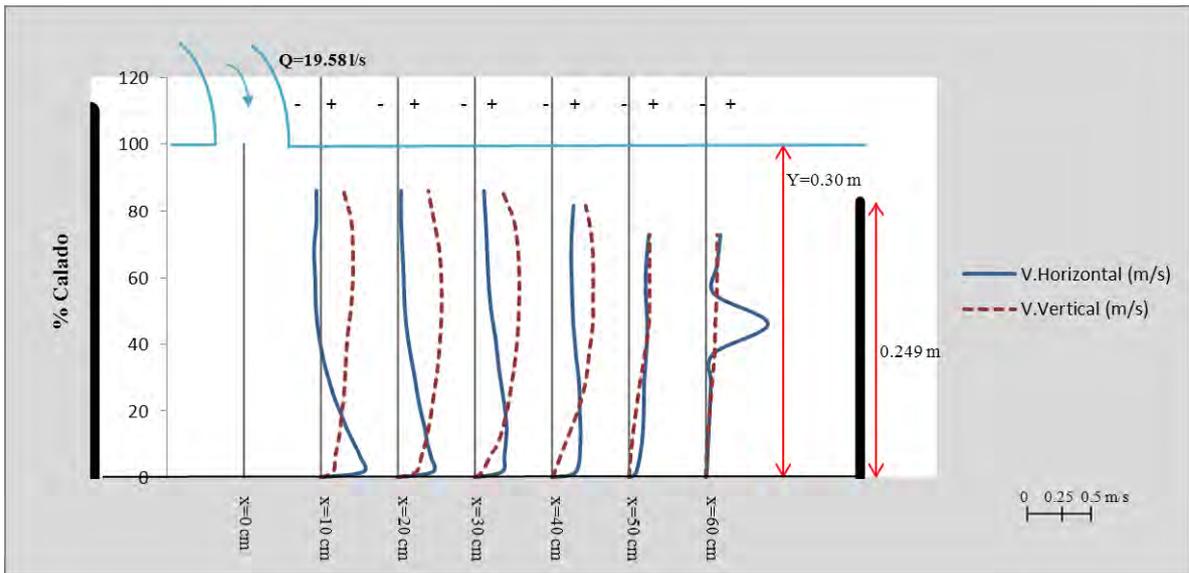


Figura VI.20: Perfiles de velocidad cada 10 cm desde el punto de impacto del chorro, para un caudal de 19.58 l/s e Y=30 cm.

En la Figura VI.21 se grafica la tendencia de las velocidades medias horizontales.

Los perfiles más próximos al chorro evolucionan desde la solera, donde alcanzan las máximas velocidades, hacia valores menores de velocidad cuando se acercan a la superficie, a causa del retroceso del flujo producido en el resalto. Conforme los perfiles se alejan de la zona de impacto; se adquieren incrementos en la velocidad horizontal y su distribución se asemeja a la del flujo gradualmente variado.

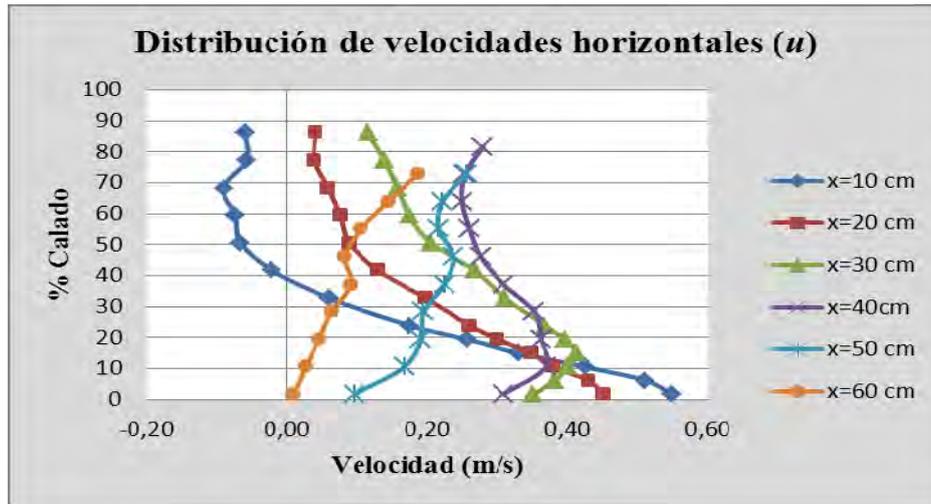


Figura VI.21: Distribución de velocidades medias horizontales dentro del colchón de agua para $Q=19.58$ l/s; $Y=30$ cm.

En la Figura VI.22 se grafica la tendencia de las velocidades medias verticales.

Los perfiles de velocidad vertical tienden a aumentar la velocidad conforme se alejan de la solera, alcanzando su máxima velocidad de ascenso en torno al 60% del calado. Para los perfiles situados entre $x=10$ y $x=40$ se observa una disminución de velocidad cerca de la superficie, lo que puede indicar que en esta zona se sitúa el resalto sumergido.

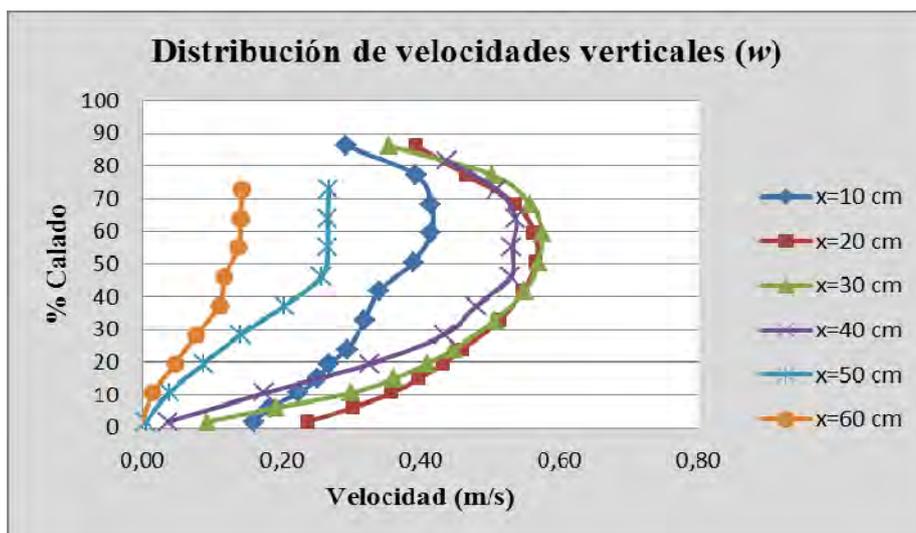


Figura VI.22: Distribución de velocidades medias verticales dentro del colchón de agua para $Q=19.58$ l/s; $Y=30$ cm.

En la Figura VI.23 se grafica la velocidad turbulenta horizontal para las distintas secciones de estudio.

Observamos que en los cuatro perfiles cercanos al impacto del chorro se experimenta una distribución por encima del chorro de fondo hacia un valor en torno a 0.30 m/s y 0.60 m/s. Los perfiles más alejados mantienen una distribución en la columna de agua con valores de velocidad turbulenta menores.

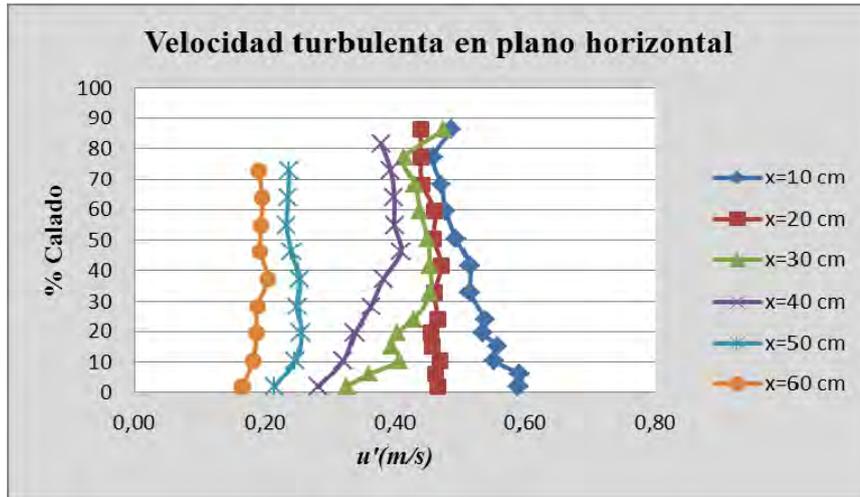


Figura VI.23: Velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=19.58$ l/s; $Y=30$ cm.

En la Figura VI.24 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano transversal y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 30 cm.

Los valores v'/u' que forman los perfiles de las velocidades turbulentas tienden agruparse entre 0.8 y 1.09.

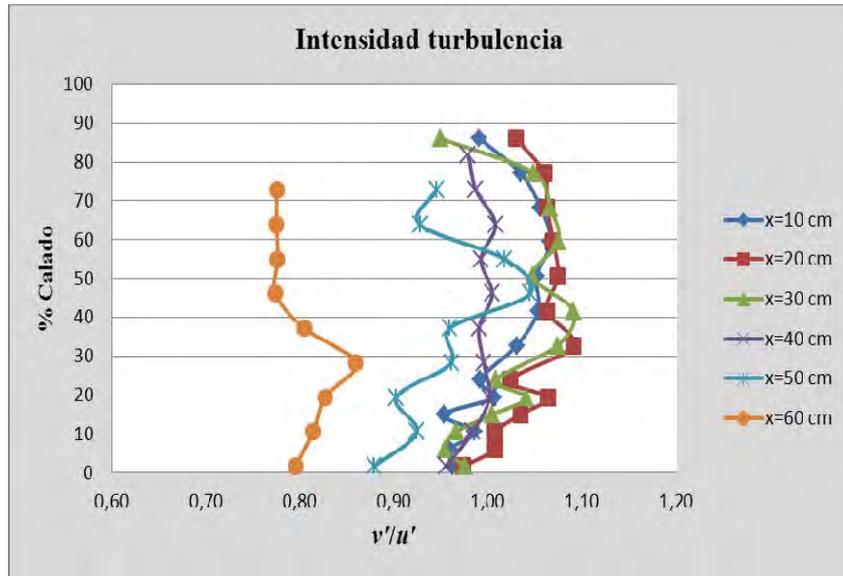


Figura VI.24: Relación entre la velocidad turbulenta transversal y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=19.58$ l/s; $Y= 30$ cm.

En la Figura VI.25 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano vertical y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 30 cm.

Para perfiles más cercanos al impacto del chorro adquieren valores de w'/u' cercanos a 0.3 en toda la columna de agua. Mientras que en los perfiles más alejados se produce un incremento conforme aumenta el calado.

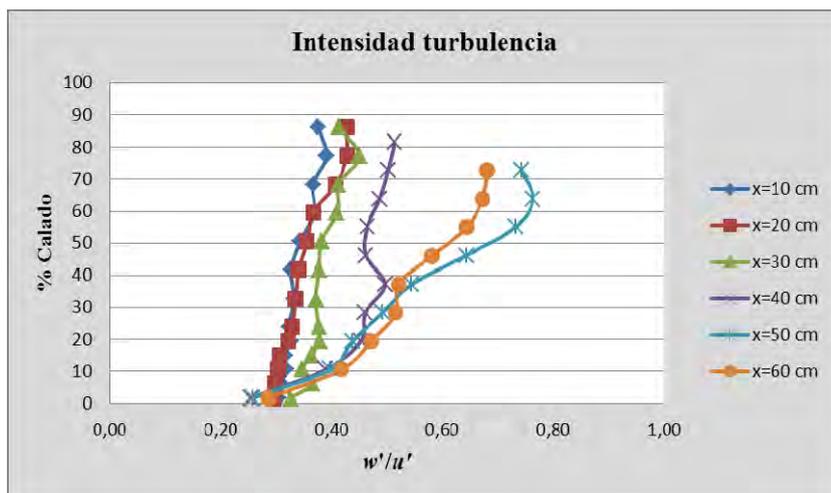


Figura VI.25: Relación entre la velocidad turbulenta vertical y velocidad horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=19.58$ l/s; $Y= 30$ cm.

La Figura VI.26 muestra los valores de la energía cinética turbulenta referentes a las distintas secciones de estudio.

En el perfil situado a 10 cm del punto de impacto directo del chorro se registra una mayor producción de energía cinética turbulenta, alcanzando un valor máximo de $0.35 \text{ m}^2/\text{s}^2$. La energía se va disipando a partir del segundo perfil de modo que en $x=60 \text{ cm}$ se tienen un valor máximo de $0.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

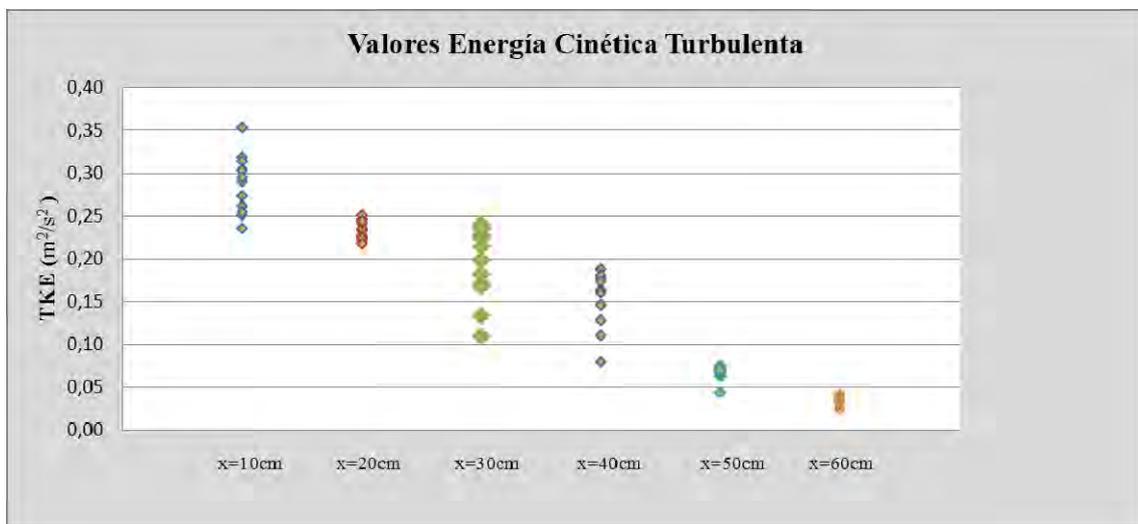


Figura VI.26: Desarrollo de la energía cinética turbulenta para $Q=19.58 \text{ l/s}$; $Y=30 \text{ cm}$.

La Figura VI.27 muestra la evolución de la energía cinética turbulenta en los diferentes perfiles a lo largo del cuenco de amortiguación.

Los perfiles próximos al punto de incidencia del chorro presentan mayor energía cinética turbulenta. En $x=10 \text{ cm}$ el máximo lo situamos próximo a la solera pero conforme avanzan hacia la superficie la energía va decayendo. Los últimos perfiles experimentan valores bajos de TKE, por lo que el resalto sumergido se ha disipado antes de llegar al perfil $x=50 \text{ cm}$.

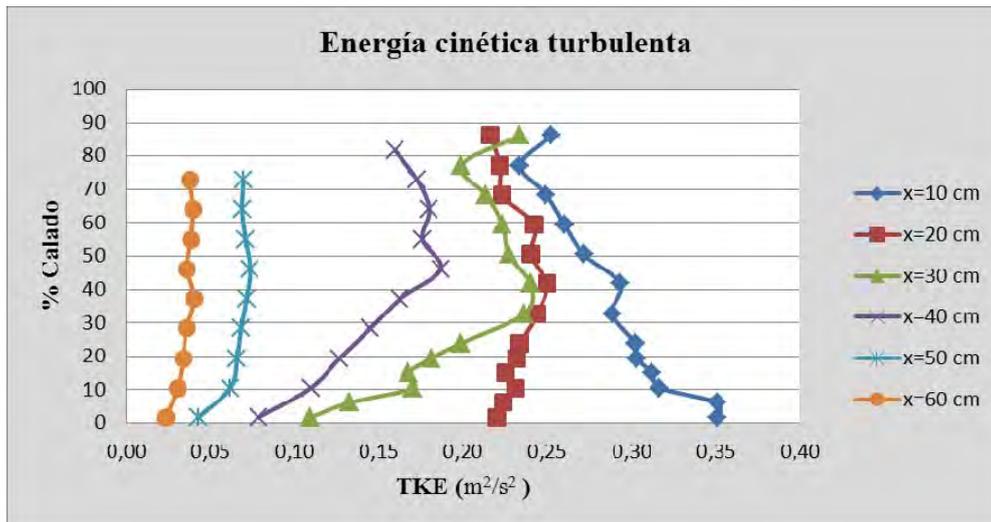


Figura VI.27: Perfiles de energía cinética turbulenta en el cuenco, para $Q=19.58$ l/s; $Y=30$ cm.

Colchón $Y=38.5$ cm.

En la Figura VI.28 se puede apreciar la distribución de velocidades horizontales y verticales, en las diferentes secciones de estudio, logradas con un colchón de $Y=38.5$ cm.

Podemos observar que la distribución de velocidades en todas las secciones de estudio siguen una tendencia propia del flujo en canales. En los tres primeros perfiles la intensidad del resalto sumergido provoca avances del flujo turbulento dando lugar así a velocidades horizontales y verticales elevadas e incluso llegan a confluír en un punto cercano al 82% del calado. Posteriores perfiles experimentan a lo largo del cuenco disminución debido a la recirculación del flujo.

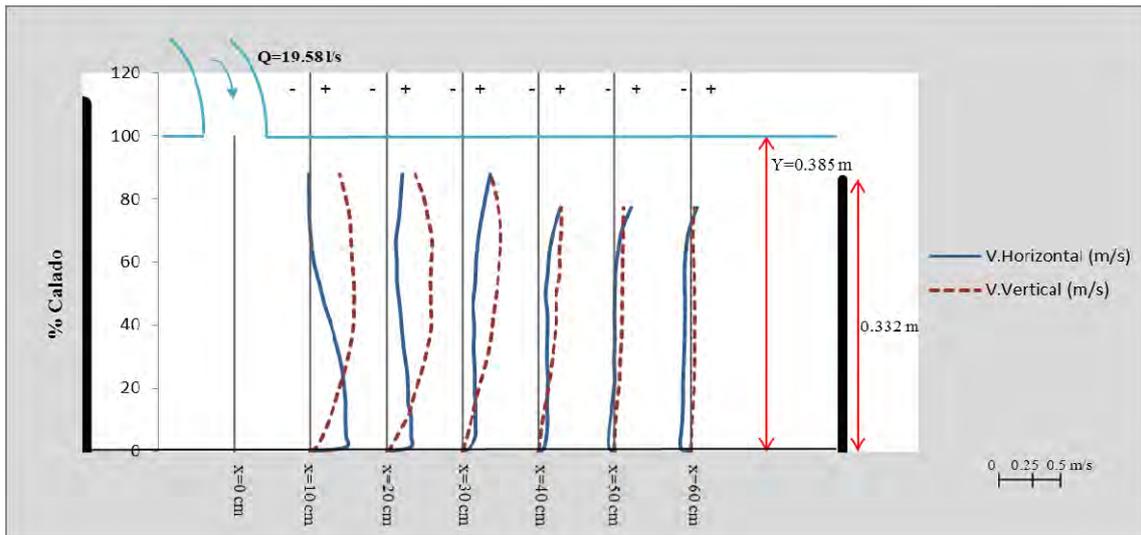


Figura VI.28: Perfiles de velocidad cada 10 cm desde el punto de impacto del chorro, para un caudal de 19.58 l/s e $Y=38.5$ cm.

En la Figura VI.29 se grafica la tendencia de las velocidades medias horizontales.

Con este mayor colchón de agua, se nota la influencia de la contrapresa en el registro de velocidades. En los perfiles situados a 50 y 60 cm del chorro, se tienen valores negativos de la velocidad horizontal. En los dos perfiles intermedios se tienen perfiles de velocidad típicos de flujo gradualmente variado. Por último en el primer perfil se aprecia que el chorro se ha difundido en el colchón de agua, obteniéndose un valor en torno a 0.46 m/s hasta un 20% del calado.

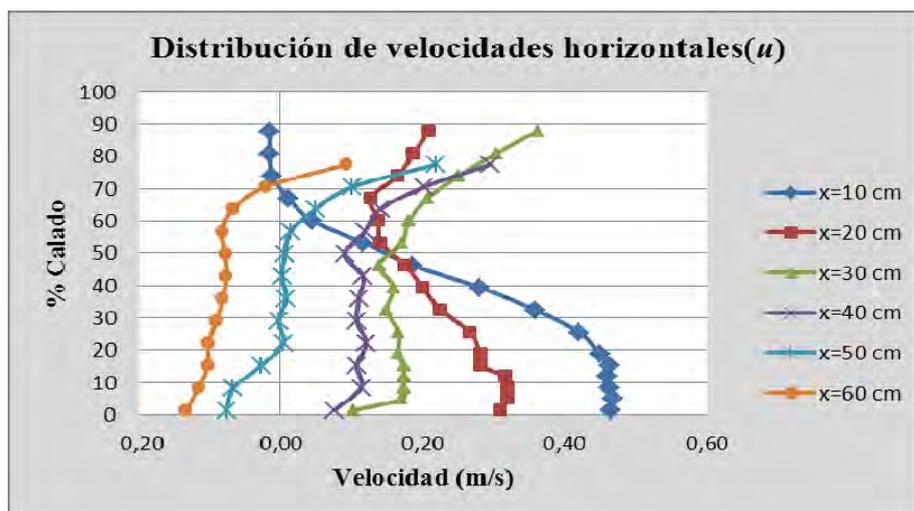


Figura VI.29: Distribución de velocidades medias horizontales dentro del colchón de agua para $Q=19.58$ l/s; $Y=38.5$ cm.

En la Figura VI.30 se grafica la tendencia de las velocidades medias verticales.

En general, la velocidad vertical aumenta al alejarse de la solera, los valores máximos de velocidad vertical se obtienen entre el 40 y el 70% de calado. Las tres primeras secciones muestran una reducción de la velocidad cerca de la superficie debido a la influencia del resalto sumergido.

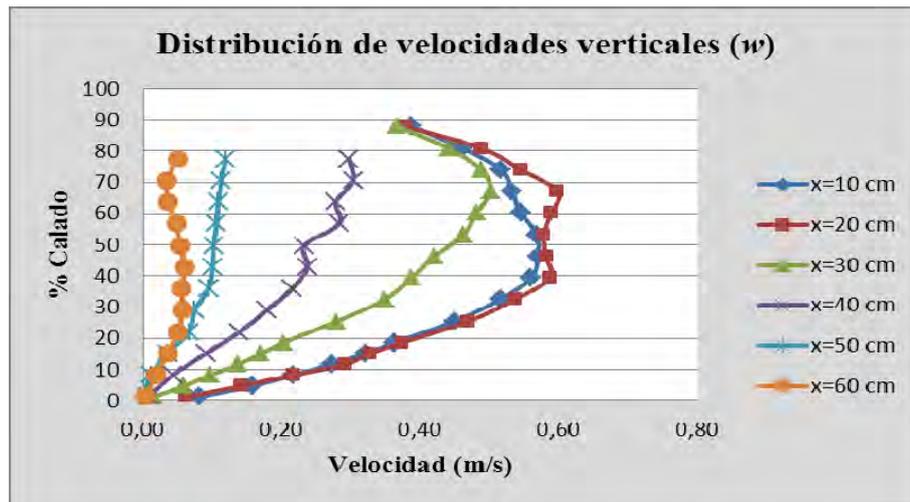


Figura VI.30: Distribución de velocidades medias verticales dentro del colchón de agua para $Q=19.58$ l/s; $Y=38.5$ cm.

En la Figura VI.31 se grafica la velocidad turbulenta horizontal para las distintas secciones de estudio.

Los mayores valores se registran en torno a un 50% del calado para el perfil situado a 10 cm del chorro incidente, de manera que los tres primeros perfiles tienden desde 0.2 m/s alcanzar valores mayores conforme se acercan a la superficie. Aguas abajo del punto de mayor fuerza los perfiles disminuyen su velocidad turbulenta horizontal dado que el resalto sumergido pierde intensidad.

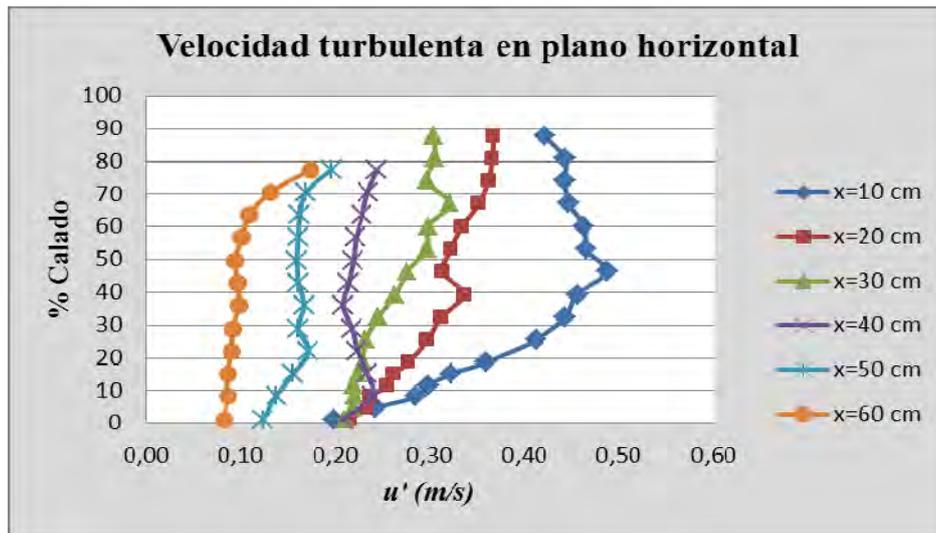


Figura VI.31: Velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=19.58$ l/s; $Y= 38.5$ cm.

En la Figura VI.32 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano transversal y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 38.5 cm.

Los perfiles presentan una variación muy similar en torno a 1 para los cuatro primeros perfiles. Los efectos de la contrapresa se muestran en los dos últimos perfiles, dando lugar aun ligero incremento de la velocidad turbulenta horizontal respecto de la componente transversal.

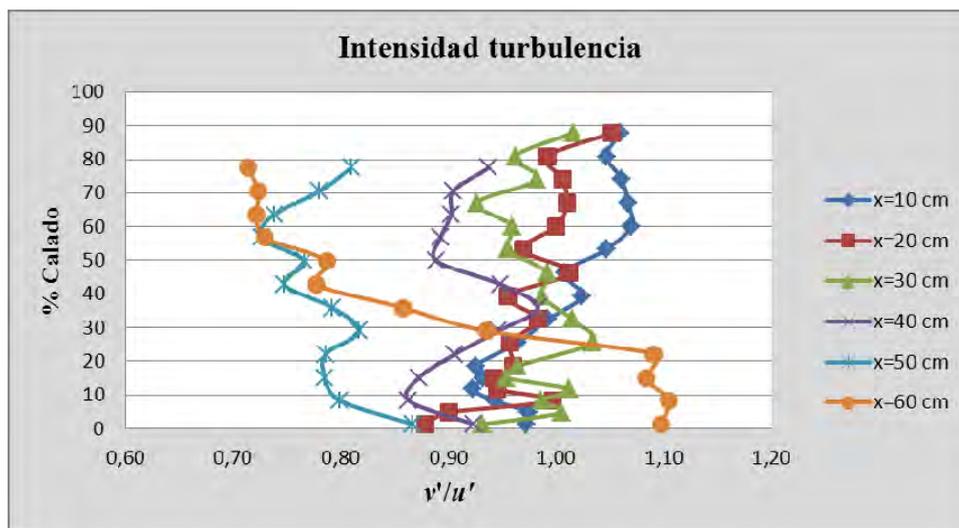


Figura VI.32: Relación entre la velocidad turbulenta transversal y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=19.58$ l/s; $Y= 38.5$ cm.

En la Figura VI.33 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano vertical y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 38.5 cm.

El perfil $x=10$ el menor valor de w'/u' (en torno a 0.4). Conforme se aleja el perfil, se observa una tendencia a igualar las dos componentes fluctuantes en las zonas próximas a la lámina libre, mientras que cerca de la solera se tiene valores alrededor de 0.3.

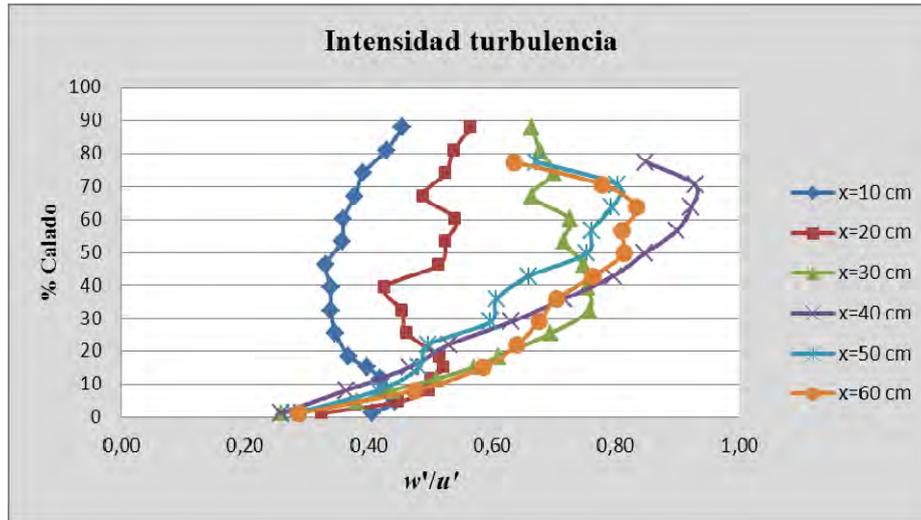


Figura VI.33: Relación entre la velocidad turbulenta vertical y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=19.58$ l/s; $Y= 38.5$ cm.

La Figura VI.34 muestra los valores de la energía cinética turbulenta referentes a las distintas secciones de estudio.

Se puede apreciar como por cada sección de estudio los valores de energía cinética turbulenta siguen un desarrollo uniforme desde el fondo de la solera aumentando hacia la superficie alcanzándose un máximo de $0.25 \text{ m}^2/\text{s}^2$ y disipándose gradualmente al avanzar a lo largo del cuenco de amortiguación, esto se debe a que la profundidad que se tiene para analizar el comportamiento del fluido es adecuada para que el equipo pueda captar las variaciones de velocidad turbulenta de las que depende la intensidad turbulenta y a su vez también la energía cinética.

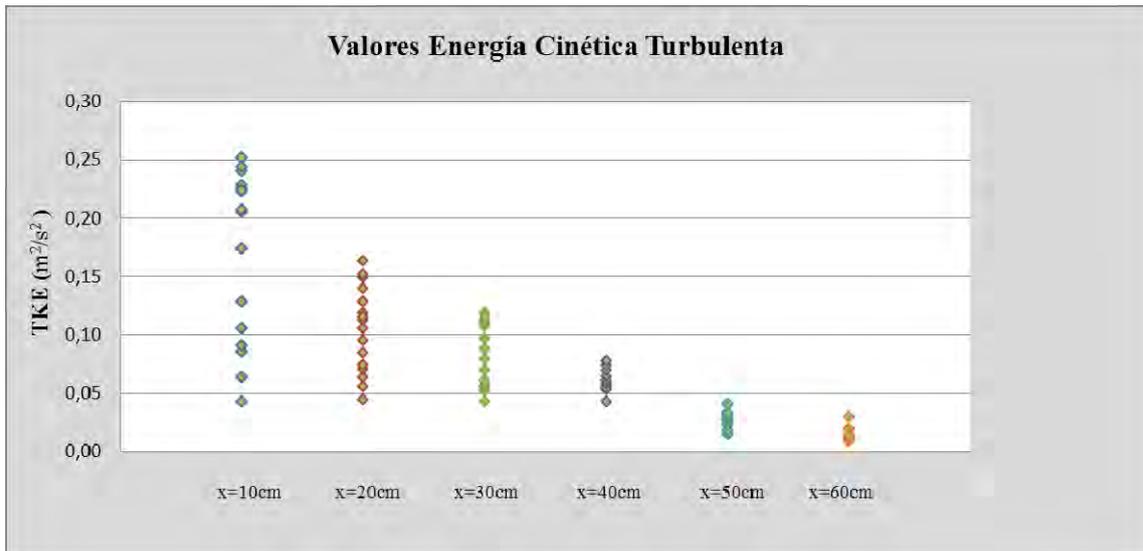


Figura VI.34: Desarrollo de la energía cinética turbulenta para Q=19.58 l/s; Y=38.5cm.

La Figura VI.35 muestra la evolución de la energía cinética turbulenta en los diferentes perfiles a lo largo del cuenco de amortiguación.

En el perfil correspondiente a la primera sección, se aprecian lo mayores valores de energía cinética. TKE aumenta desde un valor bajo en la solera hasta un valor aproximadamente constante para puntos situados por encima del 40% del calado. En las siguientes secciones se produce una rápida disminución de la energía cinética, de modo que para $x > 50$ cm se tienen valores de $TKE < 0.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

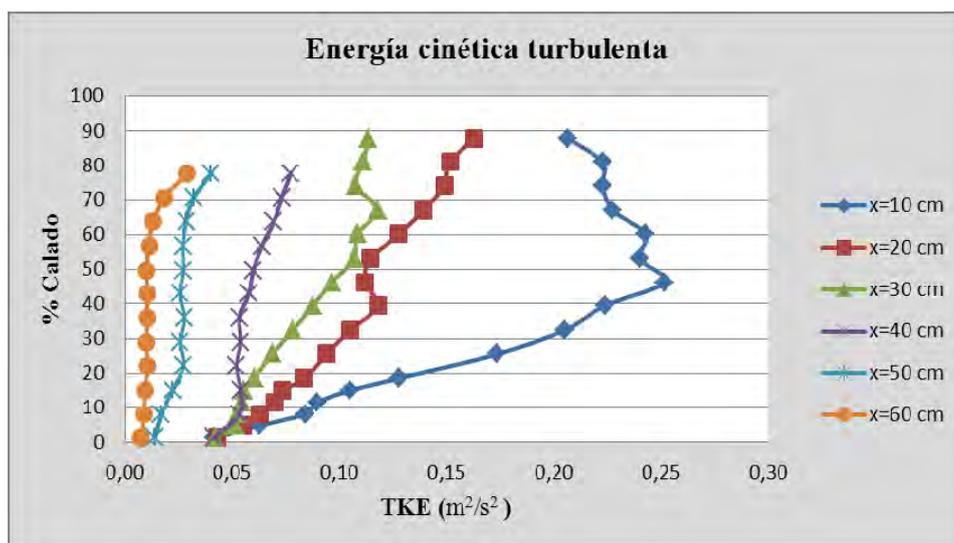


Figura VI.35: Perfiles de energía cinética turbulenta en el cuenco, para Q=19.58 l/s Y=38.5 cm.

Colchón Y=46.5 cm.

En la Figura VI.36 se puede apreciar la distribución de velocidades horizontales y verticales en las diferentes secciones de estudio, logradas con un colchón de Y=46.5cm.

En las dos primeras secciones, la distribución de velocidades es parecida observándose velocidades superiores cerca de la solera y una zona donde se invierte el sentido del flujo por lo que no existe un chorro de fondo bien definido. Desde la sección x=30 en adelante se nota la influencia de las barreras por el hecho de que los perfiles de velocidad horizontal obtienen velocidades negativas en la mitad inferior de los mismos.

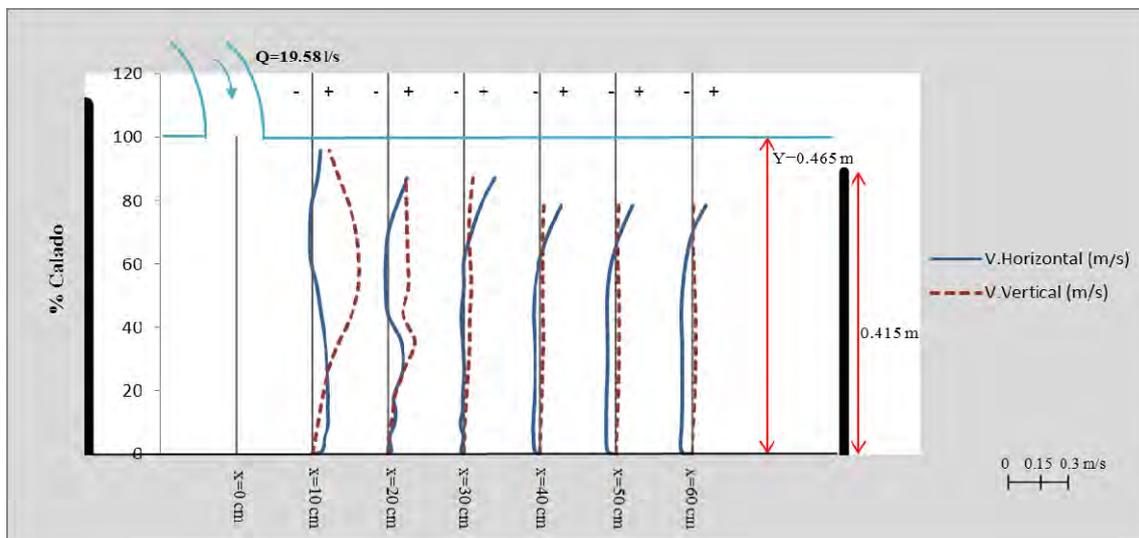


Figura VI.36: Perfiles de velocidad cada 10 cm desde el punto de impacto del chorro, para un caudal de 19.58 l/s e Y=46.5 cm.

En la Figura VI.37 se grafica la tendencia de las velocidades medias horizontales por separado.

Los perfiles de distribución de velocidad horizontal tienden a confluir para un 60% de calado. Al encontrar el fluido más agitado en las inmediaciones de la superficie se obtiene un máximo de 0.4 m/s.

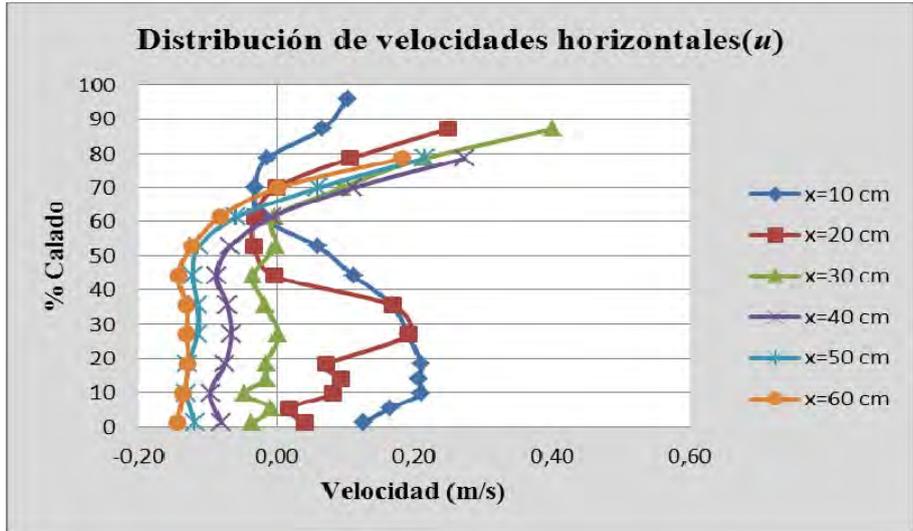


Figura VI.37: Distribución de velocidades medias horizontales dentro del colchón de agua para $Q=19.58$ l/s; $Y=46.5$ cm.

En la Figura VI.38 se grafica la tendencia de las velocidades medias verticales.

Los perfiles situados a 10 y 20 cm del impacto del chorro presentan un aumento de la velocidad vertical acorde con los puntos que se alejan de la solera, para disminuir en las proximidades de la superficie.

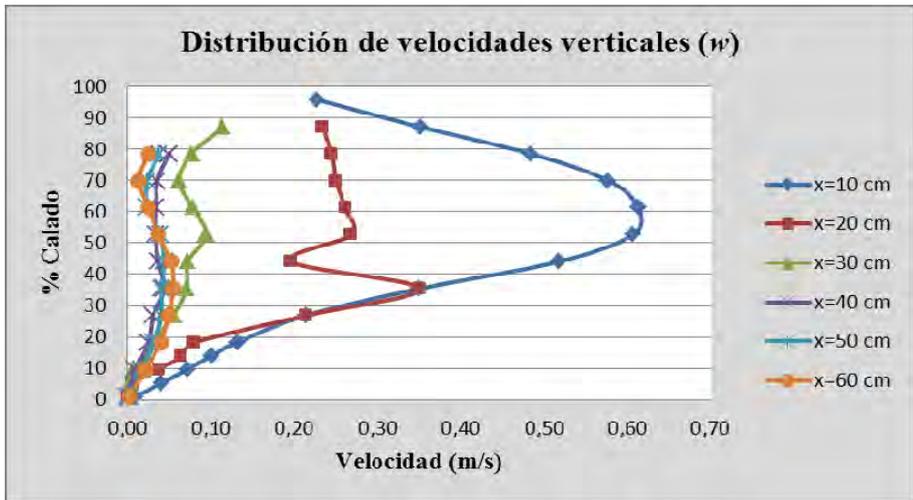


Figura VI.38: Distribución de velocidades medias verticales dentro del colchón de agua para $Q=19.58$ l/s; $Y=46.5$ cm.

En la Figura VI.39 se grafica la velocidad turbulenta horizontal para las distintas secciones de estudio.

En todos los perfiles se observa como parten desde un 0.10 m/s en la solera para incrementar posteriormente a partir de un 60% del calado, de esta forma los perfiles más cercanos a la zona de impacto experimentan los mayores valores de velocidad turbulenta.

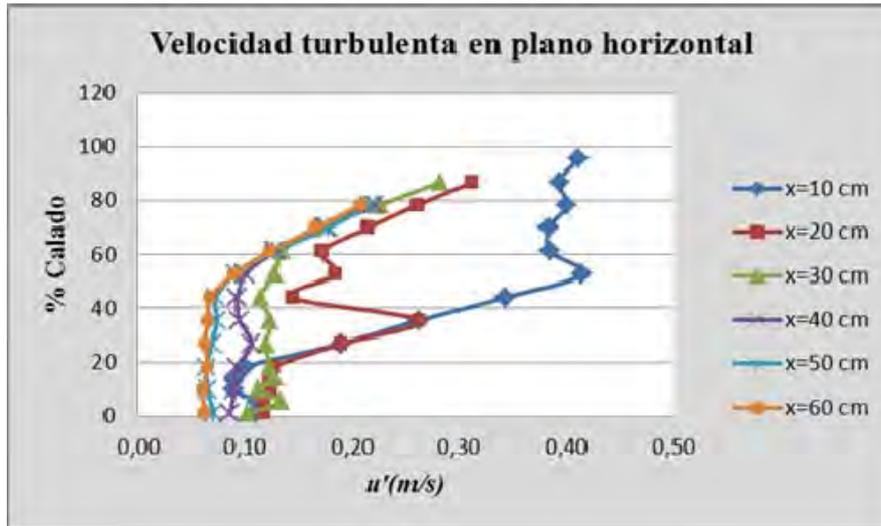


Figura VI.39: Velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=19.58$ l/s; $Y= 46.5$ cm.

En la Figura VI.40 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano transversal y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 46.5 cm.

Los valores de v'/u' están en el entorno de 0.8 tendiendo a aumentar ligeramente con el calado. Los dos últimos perfiles muestran un valor $v' > u'$ cerca de la solera, para posteriormente tender a un valor de 0.6.

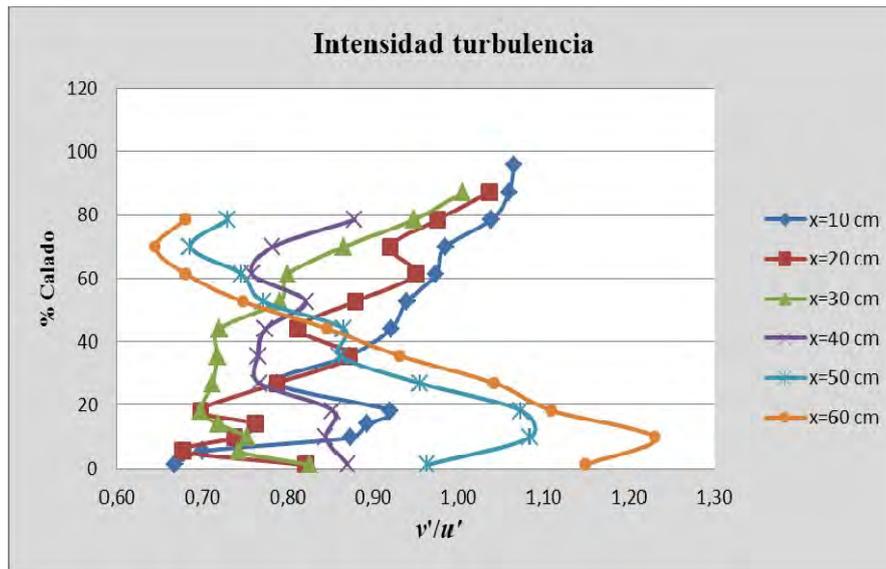


Figura VI.40: Relación entre la velocidad turbulenta transversal y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=19.58$ l/s; $Y= 46.5$ cm.

En la Figura VI.41 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano vertical y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 46.5 cm.

Cerca de la solera $w \approx 0.2$ en todos los perfiles. Cuando nos alejamos del fondo, la relación w'/u' tiende a aumentar alcanzando un máximo en torno al 60% del calado, para reducirse posteriormente cerca de la superficie.

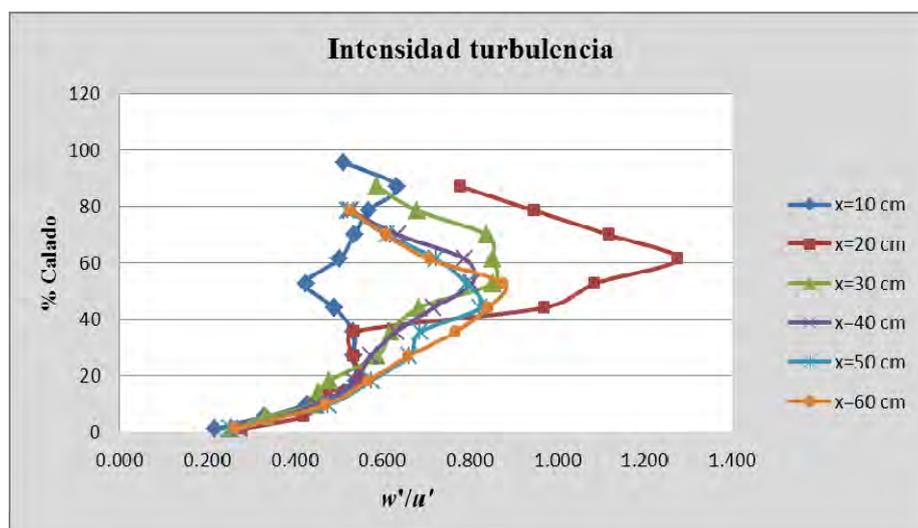


Figura VI.41: Relación entre la velocidad turbulenta vertical y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=19.58$ l/s; $Y= 46.5$ cm.

La Figura VI.42 muestra los valores de la energía cinética turbulenta, referentes a las distintas secciones de estudio.

Para el colchón de agua estudiado vemos que la mayor intensidad se registra en las primeras secciones, con un máximo de $0.20 \text{ m}^2/\text{s}^2$ en $x=10 \text{ cm}$. Aguas abajo, de la zona de impacto del chorro la energía cinética se reduce paulatinamente.

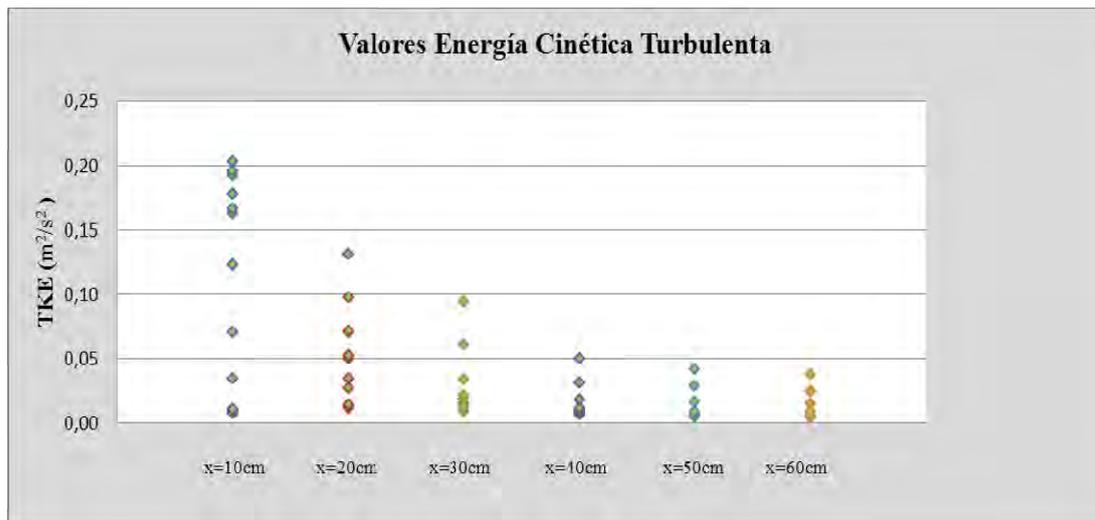


Figura VI.42: Desarrollo de la energía cinética turbulenta para $Q=19.58 \text{ l/s}$; $Y=46.5 \text{ cm}$.

La Figura VI.43 muestra la evolución de la energía cinética turbulenta en los diferentes perfiles a lo largo del cuenco de amortiguación.

El perfil situado a 10 cm de la zona de incidencia del chorro muestra los mayores valores de energía cinética turbulenta la cual aumenta conforme nos alejamos de la solera. Conforme el flujo se aleja del punto de impacto, los perfiles van perdiendo intensidad turbulenta. Cerca de la superficie, se tiende a aumentar la TKE para los perfiles posteriores debido posiblemente al movimiento del flujo que sale del cuenco por encima de la contrapresa.

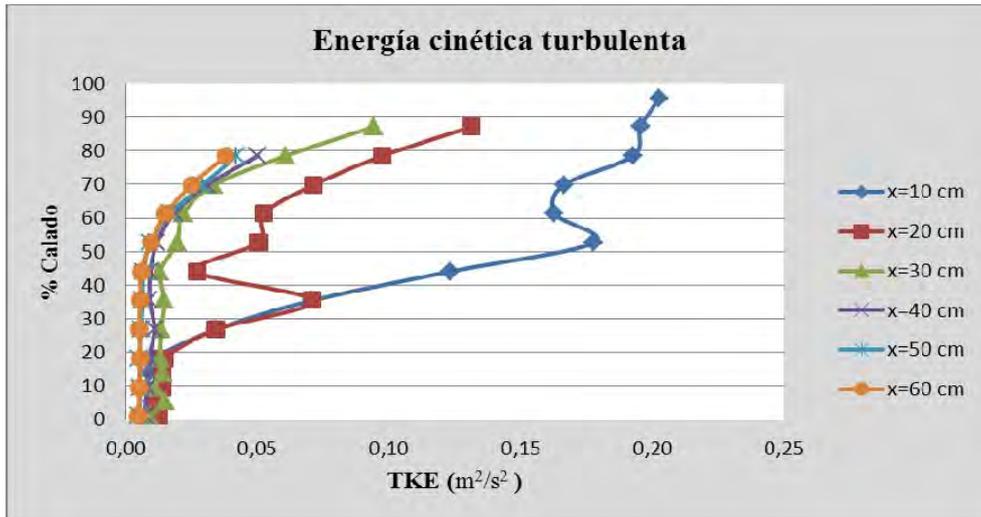


Figura VI.43: Perfiles de energía cinética turbulenta en el cuenco, para $Q=19.58$ l/s; $Y=46.5$ cm.

Colchón $Y=55$ cm.

En la Figura VI.44 se puede apreciar la distribución de velocidades horizontales y verticales en las diferentes secciones de estudio, logradas con un colchón de $Y=55$ cm.

La distribución de velocidades se ve influenciada por la contrapresión en todas las secciones. Se observa un efecto de retroceso del fluido caracterizado por las velocidades horizontales que adquieren valores negativos hasta alturas del 70 % del calado y velocidades positivas cerca de la superficie.

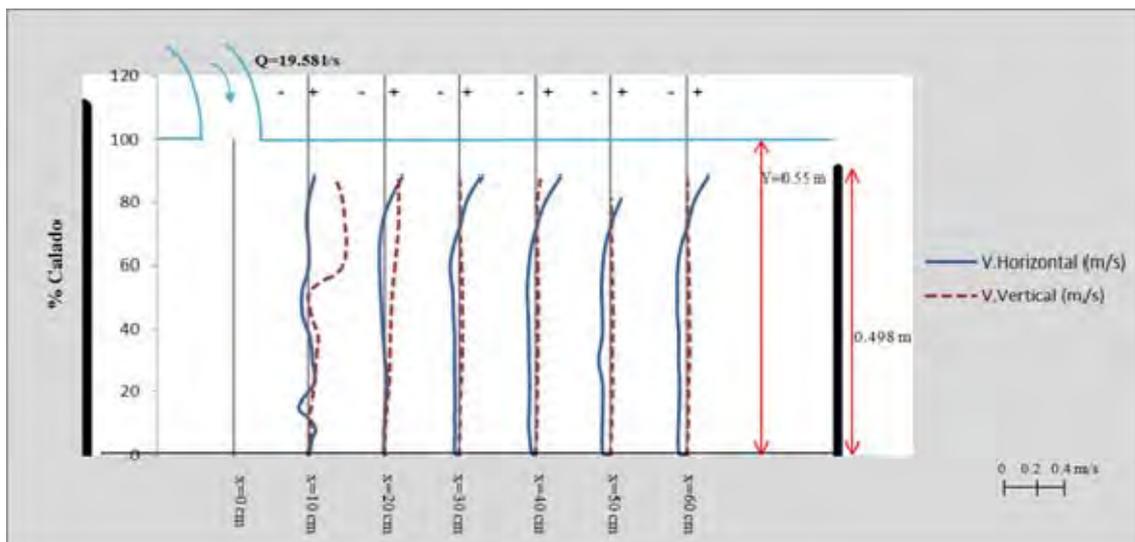


Figura VI.44: Perfiles de velocidad cada 10 cm desde el punto de impacto del chorro, para un caudal de 19.58 l/s e $Y=55$ cm.

En la Figura VI.45 se grafica la tendencia de las velocidades medias horizontales.

Vemos que todos los perfiles se desarrollan desde el fondo con velocidades negativas pero conforme avanzan hacia la superficie los incrementos de velocidad horizontal se producen cercanos a la superficie rondando los 0.30 m/s y para el perfil $x=40$ cm.

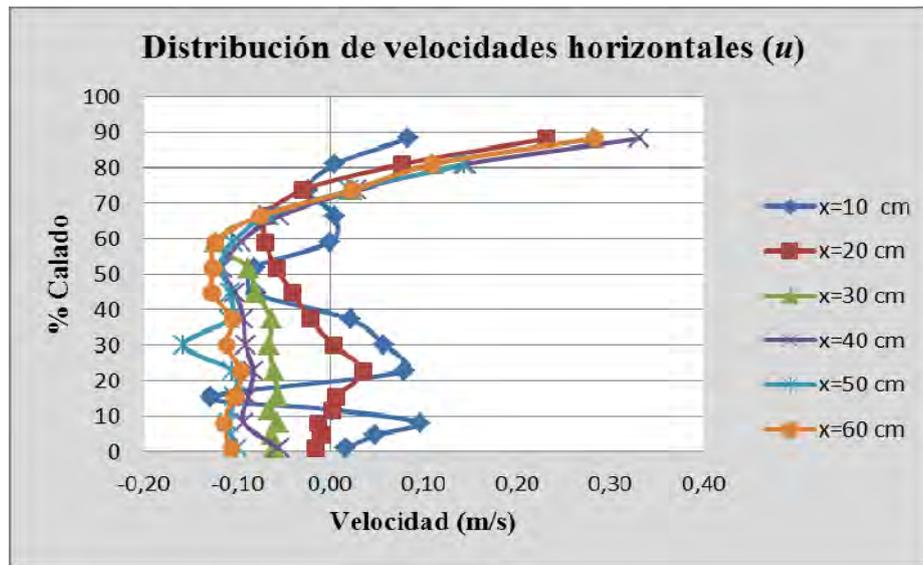


Figura VI.45: Distribución de velocidades medias horizontales dentro del colchón de agua para $Q=19.58$ l/s; $Y=55$ cm.

En la Figura VI.46 se grafica la tendencia de las velocidades medias verticales.

Al tener una mayor profundidad, 55 cm creada por seis barreras en el perfil $x=10$ cm se observa una elevada velocidad vertical para calados superiores al 60% , con un máximo de 0.48 m/s, la cual está generada por la recirculación del flujo debido ala incidencia del chorro vertiente. A partir de $x=30$ cm las velocidades verticales se reducen por debajo de 0.10 m/s.

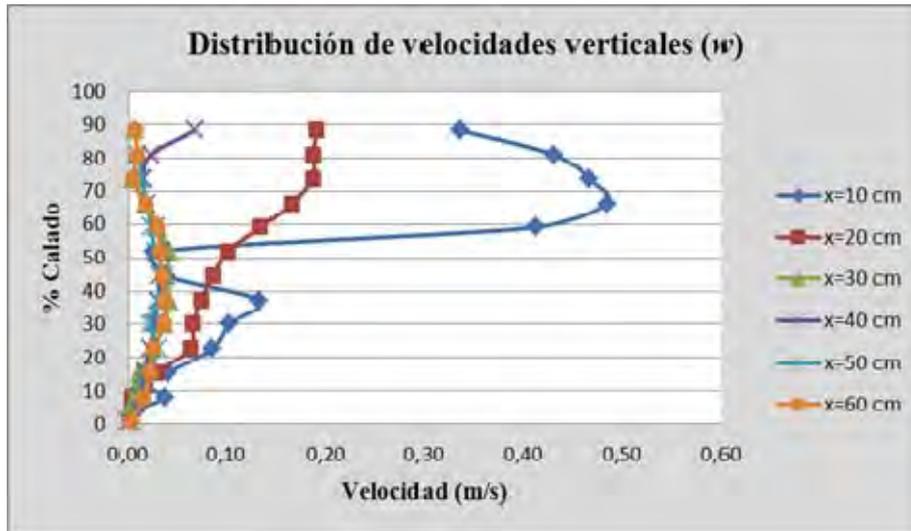


Figura VI.46: Distribución de velocidades medias verticales dentro del colchón de agua para $Q=19.58$ l/s; $Y=55$ cm.

En la Figura VI.47 se grafica la velocidad turbulenta horizontal para las distintas secciones de estudio.

En el primer perfil se registran los mayores valores de velocidad turbulenta horizontal debido a la gran fuerza turbulenta del fluido en esta sección. Para el resto de perfiles se ve como mantienen un valor en torno a 0.06 en toda la columna de agua, pero conforme aumenta el calado también lo hace la velocidad.

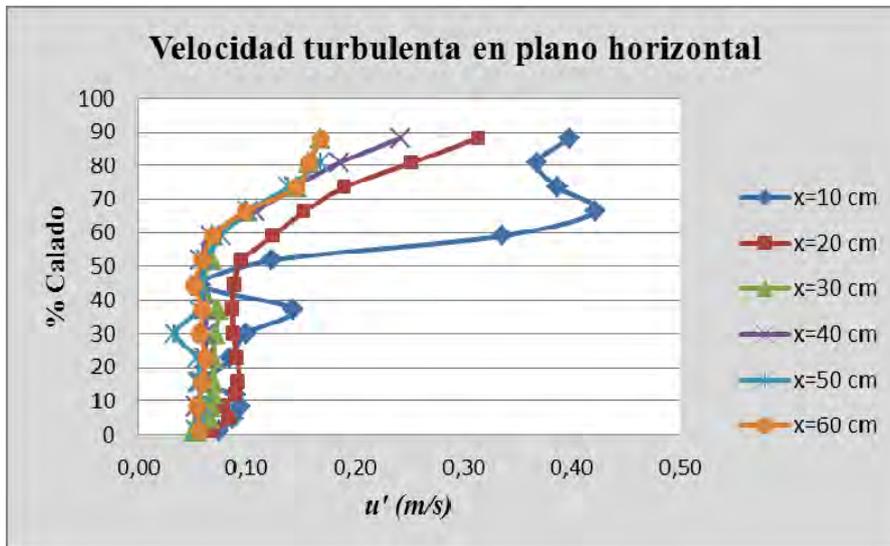


Figura VI.47: Velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=19.58$ l/s; $Y= 55$ cm.

En la Figura VI.48 se grafica la intensidad la relación entre las velocidades turbulentas en el plano transversal y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 55 cm.

Los valores de v'/u' se encuentra acotados entre 0.60 y 1.2.

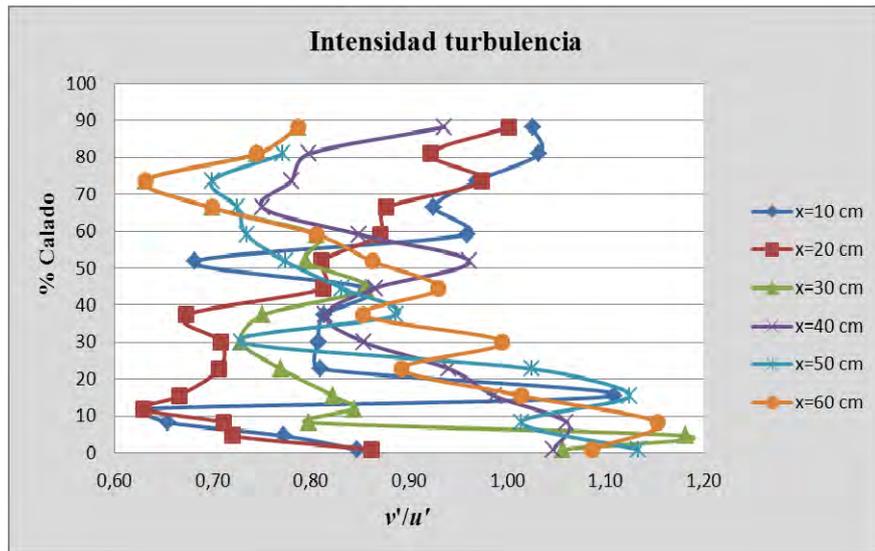


Figura VI.48: Relación entre la velocidad turbulenta transversal y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=19.58$ l/s; $Y=55$ cm.

En la Figura VI.49 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano vertical y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 55 cm.

Para todos los perfiles, se tienen un valor $w' \approx 0.2 u'$ en las solera, alcanzándose un valor en torno a 0.8 para un calado del 50%. El perfil $x=20$ cm muestra un mayor incremento de w' respecto de u' a partir de este punto. Cerca de la superficie se tienen valores próximos a 0.6 en todos los perfiles.

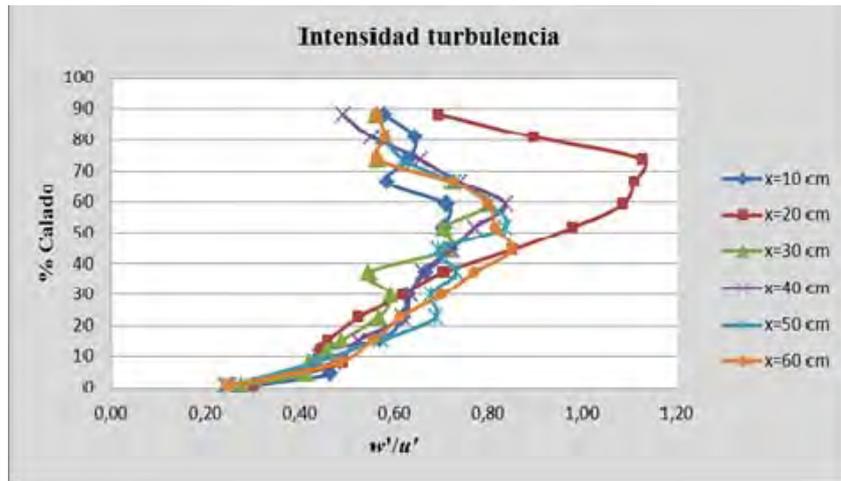


Figura VI.49: Relación entre la velocidad turbulenta vertical y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=19.58$ l/s; $Y= 55$ cm.

La Figura VI.50 muestra los perfiles de la energía cinética turbulenta, referentes a las distintas secciones de estudio.

La energía introducida por el chorro al impactar con el colchón de agua genera mayor cantidad de energía cinética turbulenta en los dos primeros perfiles. Posteriormente, se observa como los perfiles gradualmente van perdiendo energía hacia aguas abajo. Por tanto la longitud del cuenco de amortiguación resulta ser suficiente para disipar la energía cinética inicial de $0.20 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

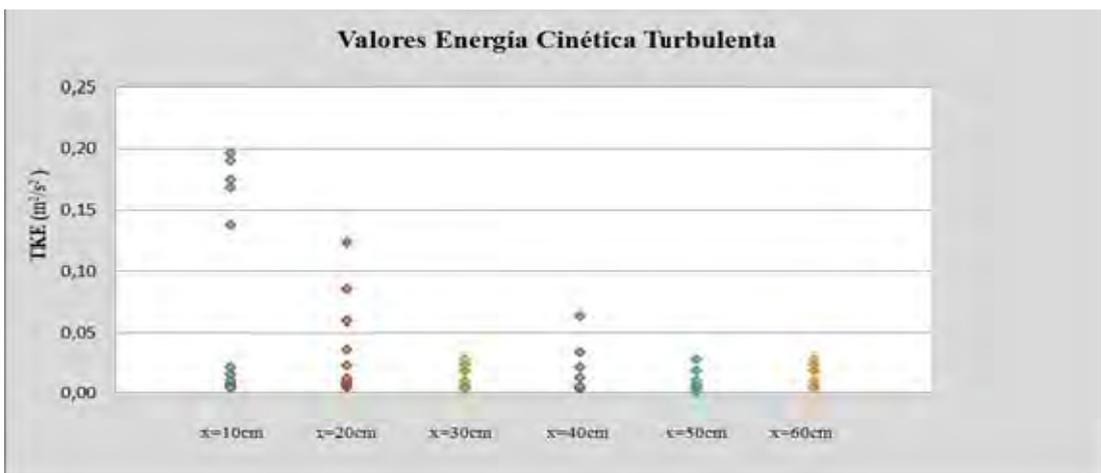


Figura VI.50: Desarrollo de la energía cinética turbulenta para $Q=19.58$ l/s; $Y= 55$ cm.

La Figura VI.51 muestra la evolución de la energía cinética turbulenta en los diferentes perfiles a lo largo del cuenco de amortiguación.

En la figura VI.51 se aprecia como los efectos de la contrapresa influyen claramente en los perfiles ya que la energía cinética desciende con rapidez hacia valores bajos en torno a 0 y $0.05 \text{ m}^2/\text{s}^2$. El perfil situado a 10 cm muestra la zona de mayor turbulencia con valores máximos de energía cinética asociados a caudales superiores al 60 %.

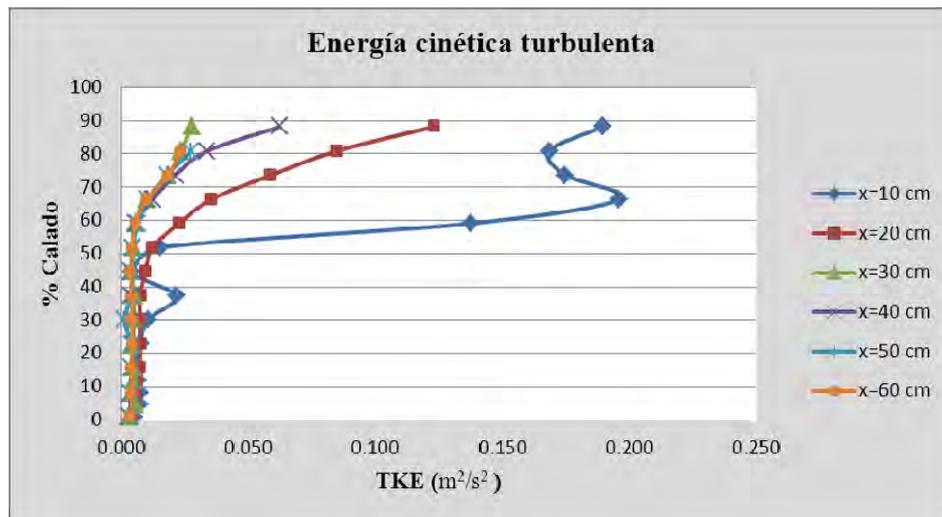


Figura VI.51: Perfiles de energía cinética turbulenta en el cuenco, para $Q=19.58 \text{ l/s}$; $Y=55 \text{ cm}$.

VI.1.2. Caudal $Q=30.67 \text{ l/s}$

Colchón $Y=15 \text{ cm}$.

En la Figura VI.52 se puede apreciar la distribución de velocidades horizontales y verticales en las diferentes secciones de estudio, logradas con un colchón de $Y=15 \text{ cm}$.

Tanto las velocidades verticales como las horizontales presentan una evolución similar aguas abajo del punto de impacto del chorro. De manera que el efecto del chorro de fondo es bastante débil. Para este colchón de 15 cm solo se consigue medir hasta un 40% del calado.

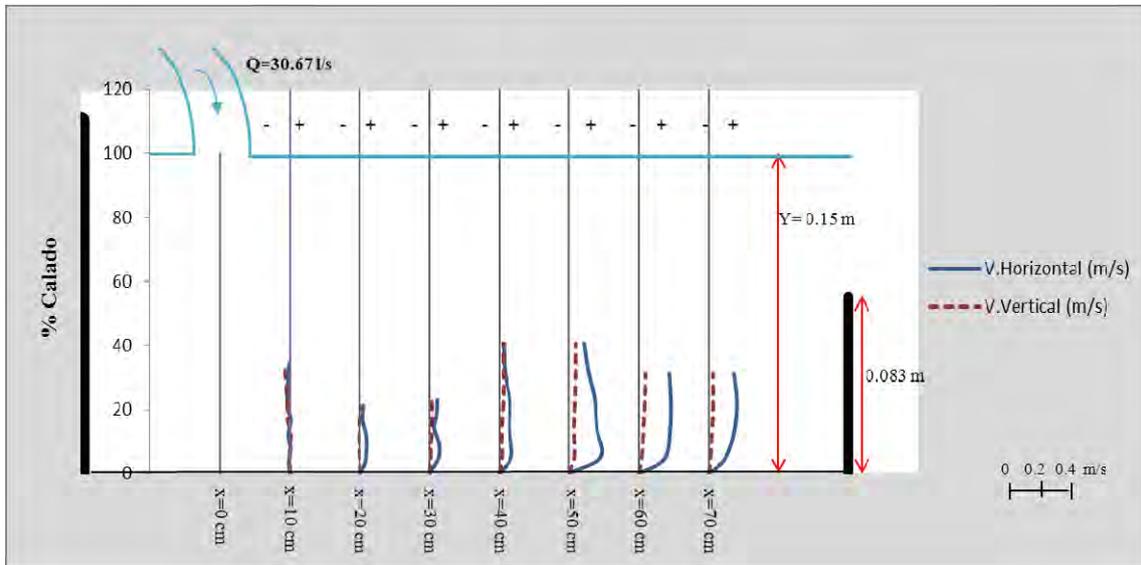


Figura VI.52: Perfiles de velocidad cada 10 cm desde el punto de impacto del chorro, para un caudal de 30.67 l/s e Y=15 cm.

En la Figura VI.53 se presenta la tendencia de las velocidades medias horizontales.

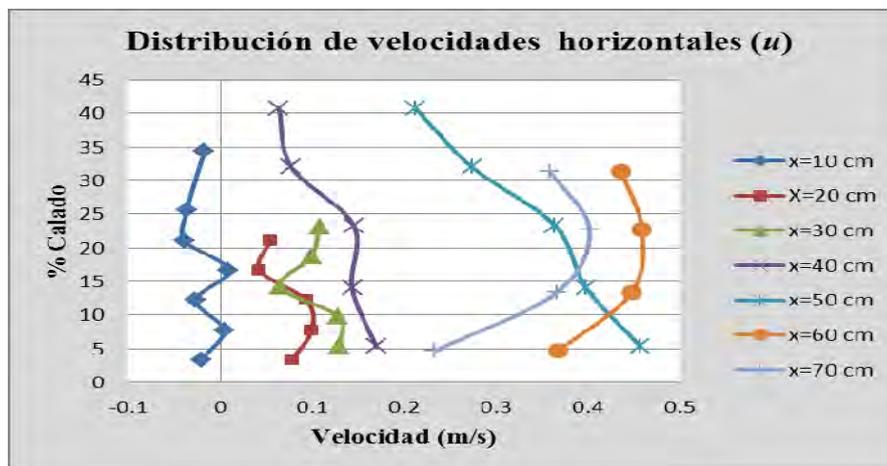


Figura VI.53: Distribución de velocidades medias horizontales dentro del colchón de agua para Q=30.67 l/s; Y=15 cm.

Tanto los perfiles de velocidades verticales como las horizontales presentan una evolución un tanto dispersa. La relación entre ellas es inversa al lograrse incrementos de velocidad vertical por encima del resalto hidráulico (Figura VI.54), ocurriendo al contrario para la velocidad horizontal. De tal forma que la distribución de velocidades horizontales a lo largo del cuenco de amortiguación es mucho mayor en referencia a la velocidad vertical, con un valor máximo de 0.45 m/s (Figura VI.53).

En la Figura VI.54 se presenta la tendencia de las velocidades medias verticales.

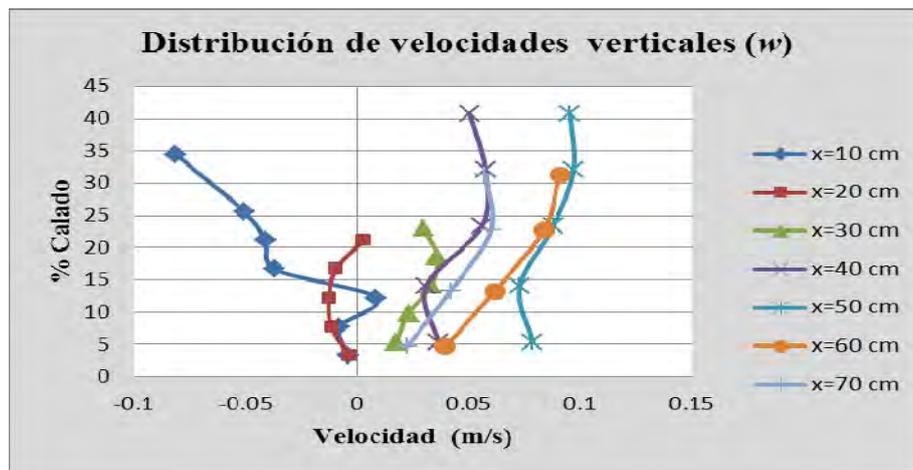


Figura VI.54: Distribución de velocidades medias verticales dentro del colchón de agua para $Q=30.67$ l/s; $Y=15$ cm.

En la Figura VI.56 se grafica la velocidad turbulenta horizontal para las distintas secciones de estudio.

Se puede observar que los incrementos de velocidad turbulenta se presentan cerca del 20 % del calado y dirigida hacia la superficie los perfiles tienden hacia un valor en torno a 0.1 m/s.

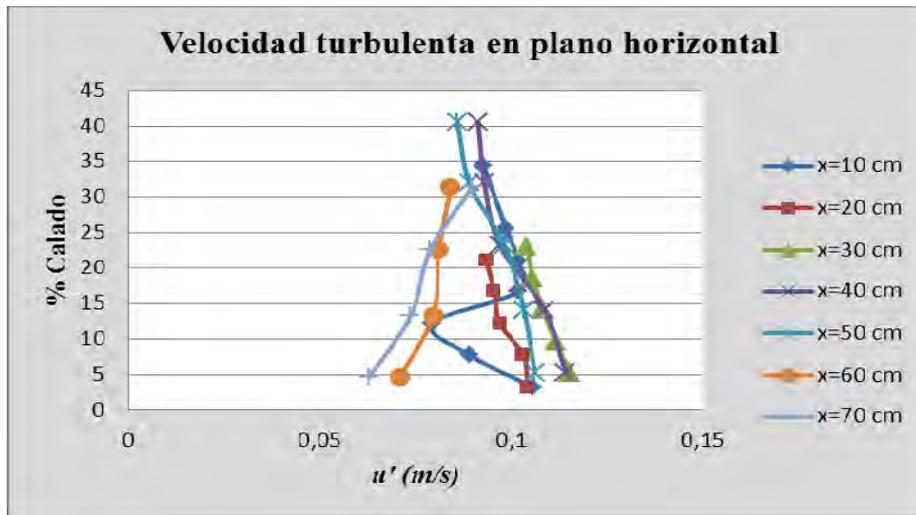


Figura VI.56: Velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=30.67$ l/s; $Y=15$ cm.

En la Figura VI.57 la relación entre las velocidades turbulentas en el plano transversal y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 15 cm.

Existe una gran variación de las velocidades turbulentas desde el fondo hacia la superficie con un rango de 0.97 y 1.03. Los más afectados resultan ser los dos perfiles que se encuentran más cercanos a la zona de mayor turbulencia.

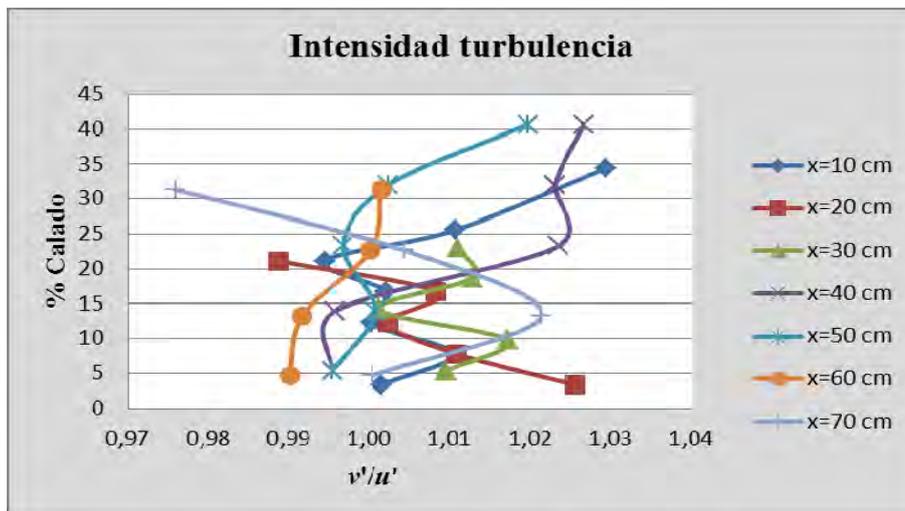


Figura VI.57: Relación entre la velocidad turbulenta transversal y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=30.67$ l/s; $Y=15$ cm.

En la Figura VI.58 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano vertical y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 15 cm.

Aquí nos podemos fijar en que la relación entre velocidades turbulentas adquiere valores inferiores en relación con la figura VI.57 debido a que la velocidad turbulenta horizontal es relativamente superior. Los perfiles siguen un desarrollo uniforme en torno a 0.4 y 0.6.

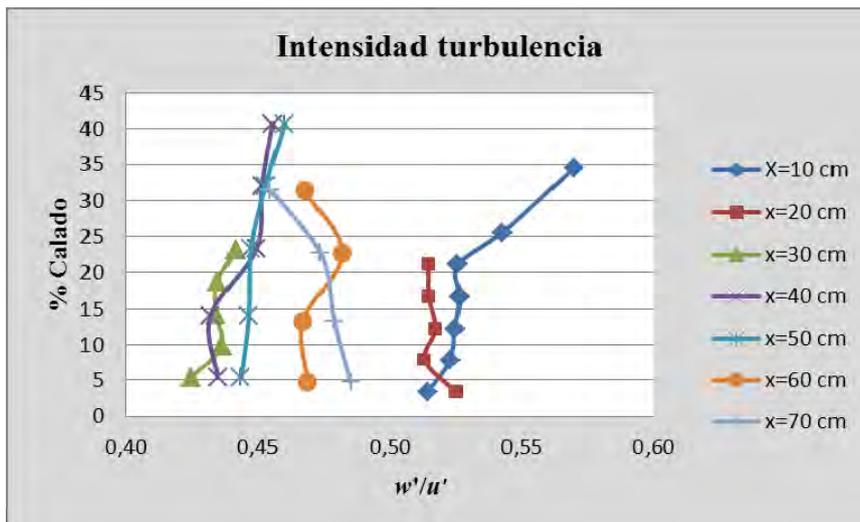


Figura VI.58: Relación entre la velocidad turbulenta vertical y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=30.67$ l/s; $Y=15$ cm.

La Figura VI.59 muestra los valores de los perfiles de la energía cinética turbulenta referentes a las distintas secciones de estudio.

El comportamiento del fluido a lo largo del cuenco de amortiguación, se presenta con una gran variación de la energía cinética turbulenta en cada una de los perfiles. Se debe a la gran turbulencia que se produce al tener poca profundidad en la que el chorro pueda amortiguar su caída. Por lo cual se registran el perfil con mayor producción de energía en $x=30$ cm.

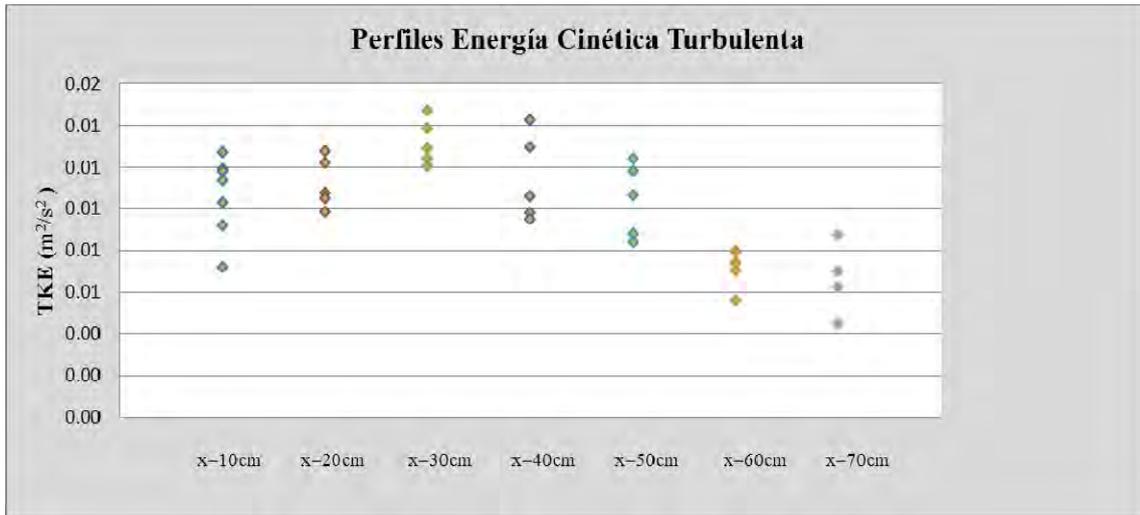


Figura VI.59: Desarrollo de la energía cinética turbulenta para $Q=30.67$ l/s; $Y=15$ cm.

La Figura VI.60 muestra la evolución de la energía cinética turbulenta en los diferentes perfiles a lo largo del cuenco de amortiguación.

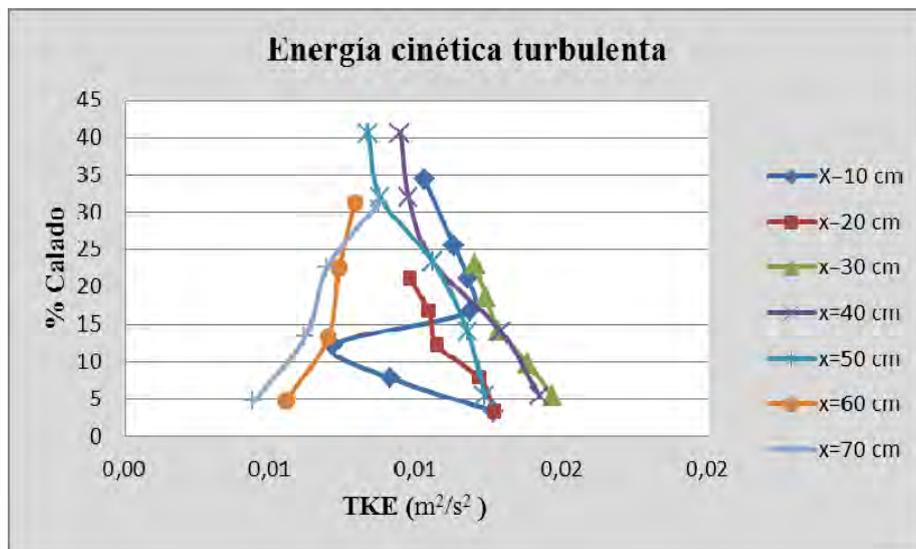


Figura VI.60: Perfiles de energía cinética turbulenta en el cuenco, para $Q=30.67$ l/s; $Y=15$ cm.

Para la figura VI.60 se puede apreciar que conforme el flujo se aleja del punto de impacto, el chorro de pared del fondo va perdiendo intensidad referente a la energía cinética turbulenta. En este caso por encima del chorro de fondo las secciones tienden a un valor de 0.009 m²/s² a causa de las perturbaciones que se generan en la parte superior del resalto sumergido.

Colchón Y=23.5 cm.

En la Figura VI.61 se puede apreciar la distribución de velocidades horizontales y verticales en las diferentes secciones de estudio, logradas con un colchón de Y= 23.5 cm.

Como se puede ver tenemos una contrapresa formada por dos barreras con una sobrelevación de 7.5 cm. Conforme nos alejamos de la zona de impacto directo, se observa como en la distribución de los perfiles de velocidad horizontal el chorro de fondo va reduciéndose por debajo de un 20% de calado a consecuencia de que la longitud del resalto sumergido es la necesaria para provocar este efecto.

Por lo que la tendencia en todos los perfiles es propia del flujo en canales.

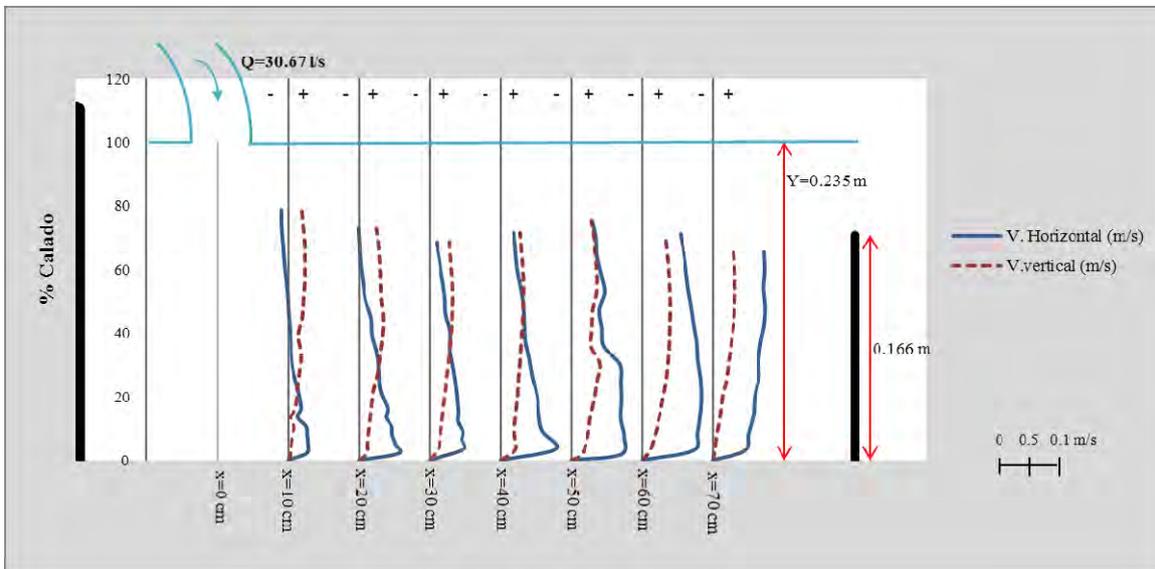


Figura VI.61: Perfiles de velocidad cada 10 cm desde el punto de impacto del chorro, para un caudal de 30.67 l/s e Y=23.5 cm.

En la Figura VI.62 se presenta la tendencia de las velocidades medias horizontales.

Vemos que los perfiles tienen una tendencia muy definida guiada por el perfil $x=10 \text{ cm}$ que sufre las perturbaciones producidas al inicio del resalto sumergido y el perfil más alejado de la zona de impacto. De manera que se alcanza un máximo de 0.83 m/s .

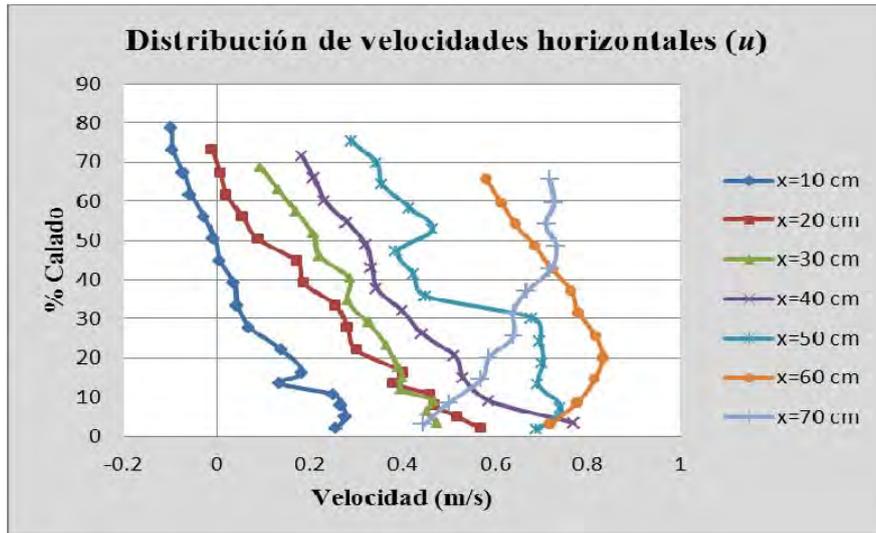


Figura VI.62: Distribución de velocidades medias horizontales dentro del colchón de agua para $Q=30.67$ l/s; $Y=23.5$ cm.

En la Figura VI.63 se presenta la tendencia de las velocidades medias verticales.

Al igual que en la figura VI.62 el desarrollo de los perfiles posee una evolución ordenada caracterizada por los perfiles de menor a mayor velocidad que se direccionan desde el fondo hacia la superficie con valores en torno a 0 y 0.4 m/s. Gracias a la fuerza que imprime el chorro a la primera sección y que por lo visto permanece agitado hasta el último perfil

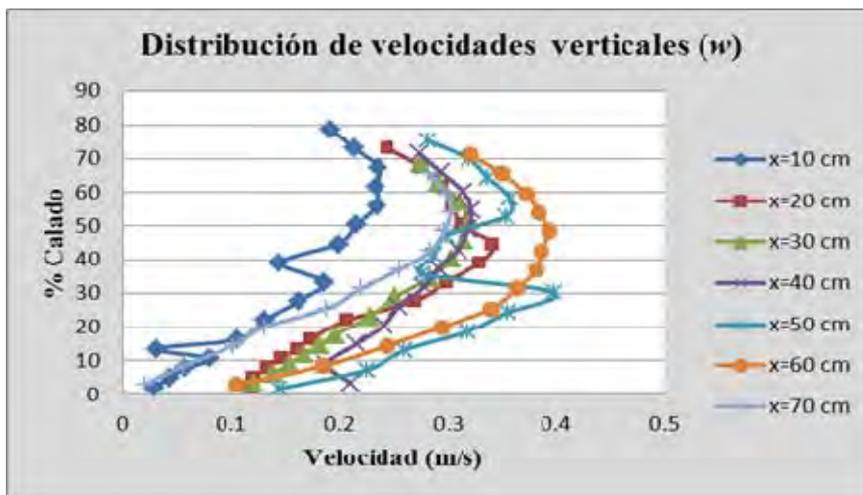


Figura VI.63: Distribución de velocidades medias verticales dentro del colchón de agua para $Q=30.67$ l/s; $Y=23.5$ cm.

En la Figura VI.64 se grafica la velocidad turbulenta horizontal para las distintas secciones de estudio.

Tenemos dos tendencias. Los perfiles cercanos a la zona de impacto registran velocidades muy bajas posiblemente por la gran cantidad de burbujas al no tener suficiente colchón de agua. Por el contrario la influencia del resalto sumergido se nota hasta el perfil 40 cm donde se alcanza un máximo de velocidad turbulenta de 1 m/s.

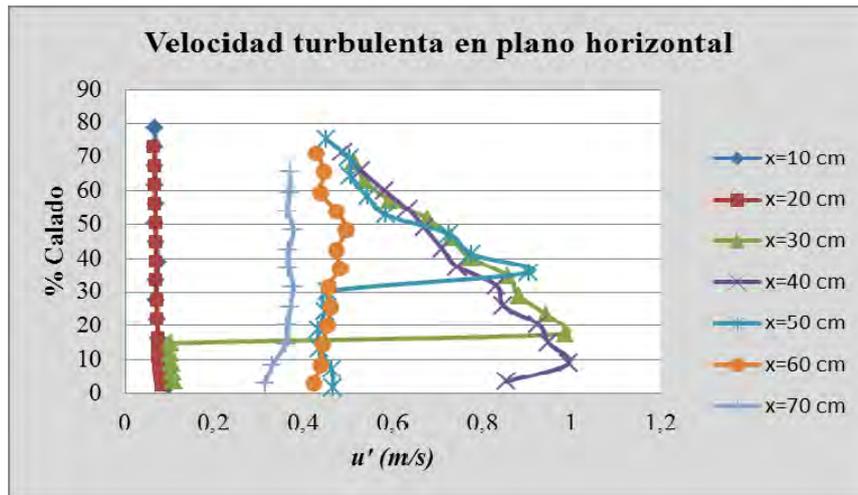


Figura VI.64: Velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=30.67$ l/s; $Y= 23.5$ cm.

En la Figura VI.65 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano transversal y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 23.5 cm.

En este caso se observa que los perfiles se dividen en dos grupos. Adquiriéndose una tendencia razonable para los primeros perfiles donde se estima un incremento de la velocidad turbulenta transversal de 1.036 por encima del chorro de fondo. En cuanto al resto de perfiles la relación entre las velocidades turbulentas es menor al encontrarse alejadas de la zona que aporta mayor turbulencia al fluido.

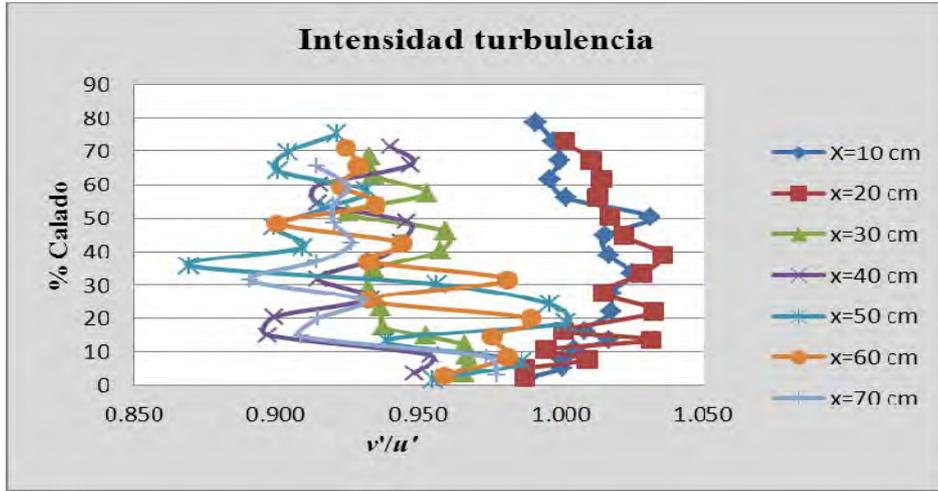


Figura VI.65: Relación entre la velocidad turbulenta transversal y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=30.67$ l/s; $Y= 23.5$ cm.

En la Figura VI.66 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano vertical y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 23.5 cm.

De la misma manera en la figura VI.66 la tendencia de los perfiles más cercanos a la zona de impacto siguen una distribución uniforme debido a que la variación entre la velocidad turbulenta horizontal y vertical es mínima. El segundo grupo formado por los últimos perfiles se direcciona hacia la superficie con valores en torno a 0.2 y 0.4.

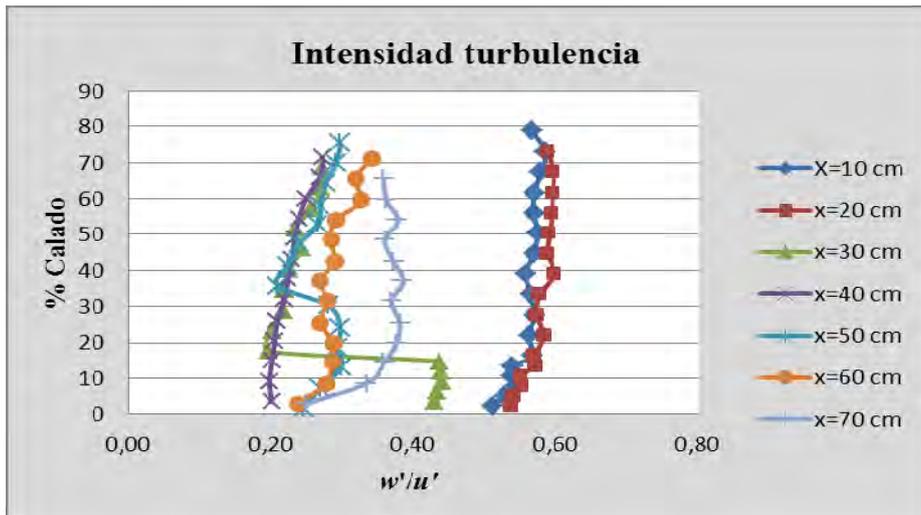


Figura VI.66: Relación entre la velocidad turbulenta vertical y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=30.67$ l/s; $Y= 23.5$ cm.

La Figura VI.67 muestra los valores de los perfiles de la energía cinética turbulenta, referentes a las distintas secciones de estudio.

Los perfiles situados a 10 y 20 cm del punto de mayor turbulencia, apenas tienen valores de energía pudiendo ser debido a la presencia de una gran cantidad de burbujas por lo que las series se ven alteradas. Inmediatamente en los tres perfiles intermedios se registra un incremento notable de la energía cinética que posteriormente es disipada hasta el último perfil.

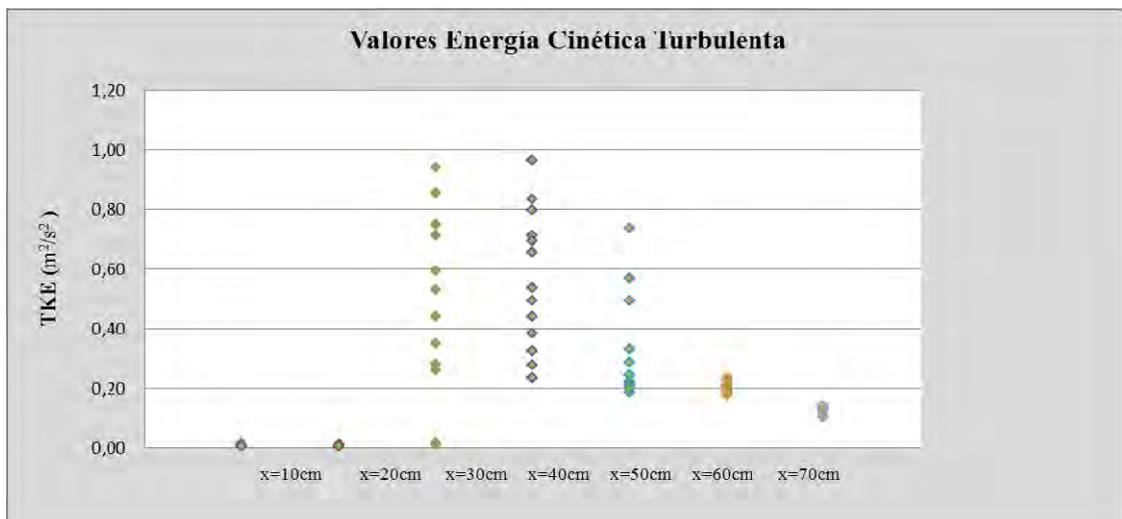


Figura VI.67: Desarrollo de la energía cinética turbulenta para $Q=30.67$ l/s; $Y=23.5$ cm.

La Figura VI.68 muestra la evolución de la energía cinética turbulenta en los diferentes perfiles a lo largo del cuenco de amortiguación.

Podemos apreciar que en las secciones 10 y 20 los valores de energía cinética turbulenta permanecen con valores casi nulos conforme aumenta el calado debido a que el equipo no capta variaciones de energía para estas zonas.

Se puede observar que la tendencia de los perfiles medios es muy parecida al desarrollarse una mayor intensidad energética de $0.96 \text{ m}^2/\text{s}^2$ a causa de que el chorro de fondo es más acusado en esta zona por el empuje del fluido. Posteriormente en los perfiles alejados de la zona de impacto la disipación de energía se va produciendo por la disminución de turbulencia.

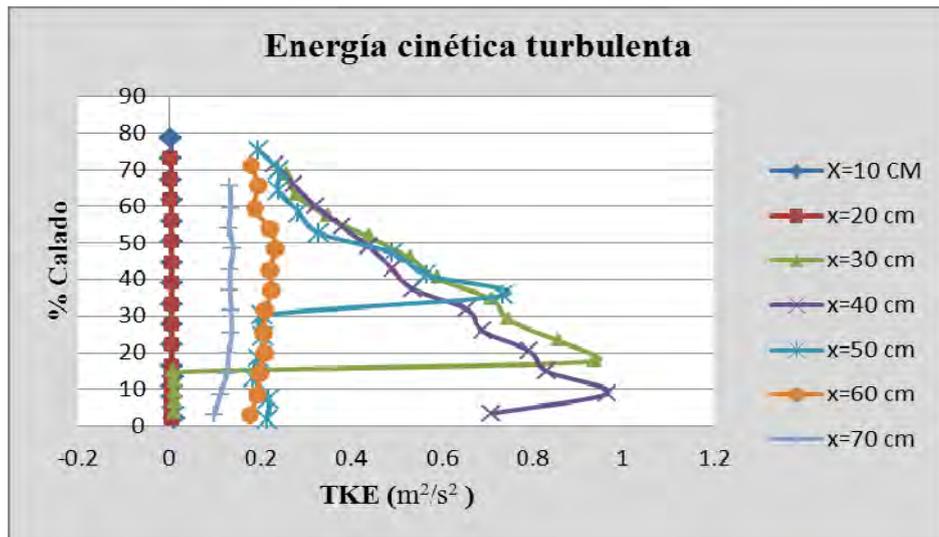


Figura VI.68: Perfiles de energía cinética turbulenta en el cuenco, para $Q=30.67$ l/s; $Y=23.5$ cm.

Colchón $Y=32$ cm.

En la Figura VI.69 se puede apreciar la distribución de velocidades horizontales y verticales en las diferentes secciones de estudio, logradas con un colchón de $Y= 32$ cm.

Podemos observar que la distribución de velocidades verticales y horizontales se direcciona de igual forma sin experimentar cambios bruscos. A partir del segundo perfil progresivamente el resalto hidráulico va perdiendo longitud por lo que simultáneamente va decayendo la intensidad del chorro de fondo.

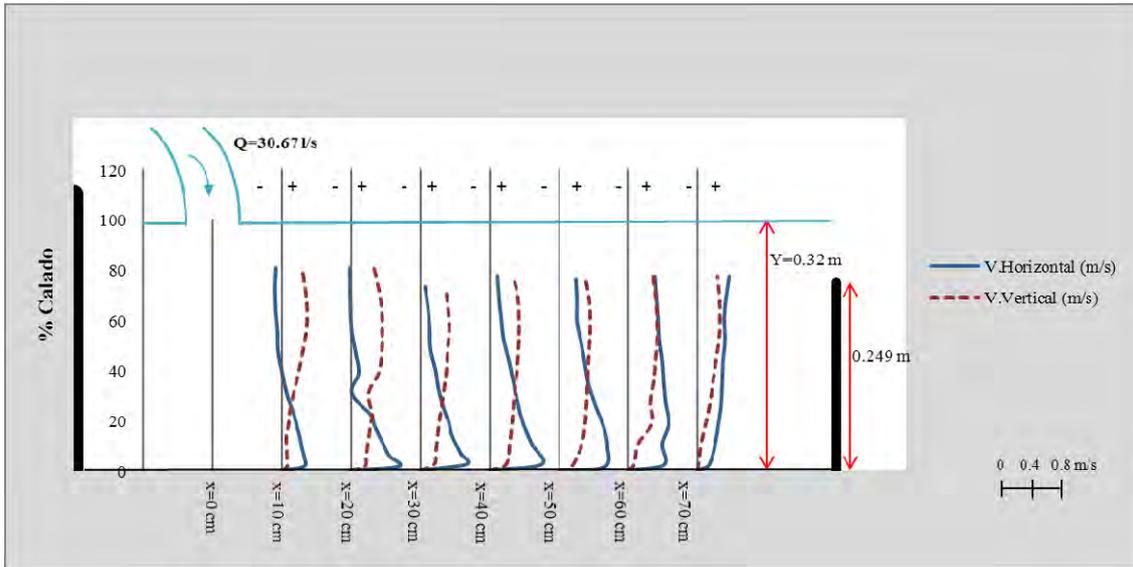


Figura VI.69: Perfiles de velocidad cada 10 cm desde el punto de impacto del chorro, para un caudal de 30.67 l/s e Y=32 cm.

En la Figura VI.70 se presenta la tendencia de las velocidades medias horizontales.

Los cinco primeros perfiles de velocidad horizontal de la figura VI.70 son propensos como se observa a seguir una distribución hacia la izquierda que va desde la quinta sección hasta la primera. De tal manera que el flujo sufre retrocesos a causa de los efectos de la contrapresión al tener un mayor colchón de agua, logrando dirigirse hacia valores menores de velocidad conforme aumenta el calado con una velocidad horizontal mínima de -0.016 m/s .

Se puede en los perfiles más alejados de la zona de impacto que llegan a confluir en las inmediaciones de la superficie.

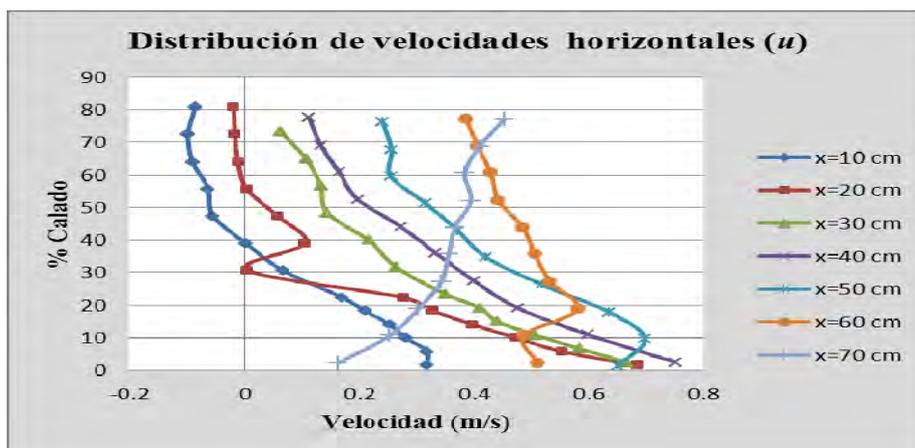


Figura VI.70: Distribución de velocidades medias horizontales dentro del colchón de agua para Q=30.67 l/s; Y=32 cm.

En la Figura VI.71 se presenta la tendencia de las velocidades medias verticales.

Vemos que en el caso de los perfiles de velocidad vertical se sigue un desarrollo parejo se notan los efectos del resalto al encontrarse más desarrollado dentro del colchón de agua y generando a su vez las perturbaciones próximas a la superficie. De manera que se consigue un incremento de 0.45 m/s en la velocidad vertical.

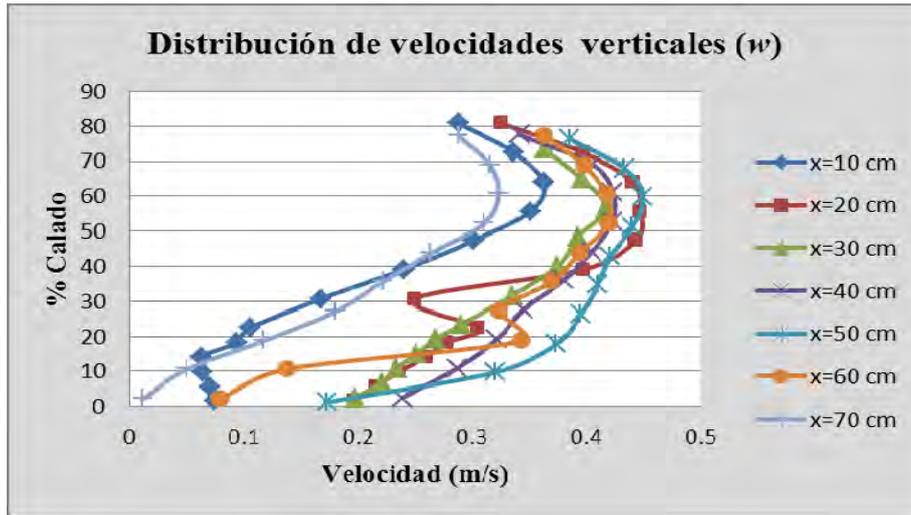


Figura VI.71: Distribución de velocidades medias verticales dentro del colchón de agua para $Q=30.67$ l/s; $Y=32$ cm.

En la Figura VI.72 se grafica velocidad turbulenta horizontal para las distintas secciones de estudio.

Se aprecia que el desarrollo de los perfiles esta guiado por el perfil 10 cm y 70 cm por lo que disminuye la velocidad turbulenta conforme el flujo se desplaza hacia aguas abajo incluso próximos a la superficie tienden a valores entre 0.2 y 0.5 m/s. Excepto para el perfil próximo a la zona del chorro incidente el cual experimenta un máximo puntual debido a que la desviación estándar es elevada con respecto a la velocidad media en ese punto.

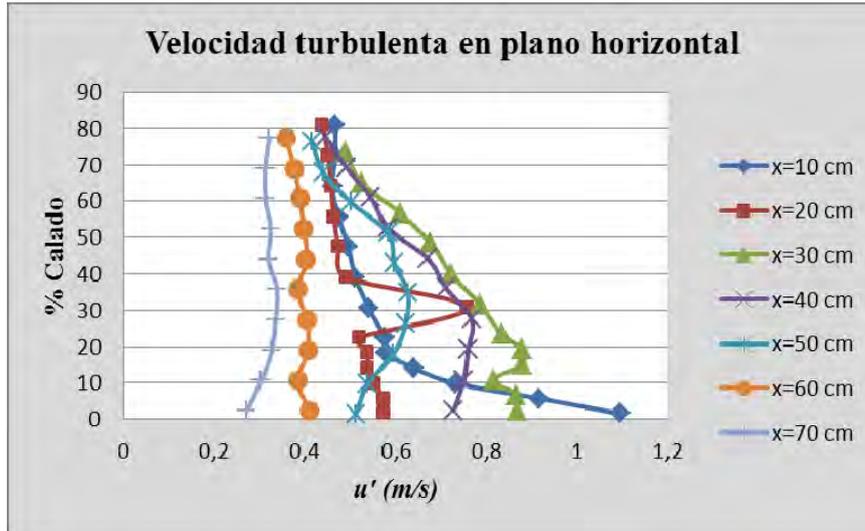


Figura VI.72: Velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=30.67$ l/s; $Y= 32$ cm.

En la Figura VI.73 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano transversal y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 32 cm.

Se observa como los perfiles conforme se aproximan a la superficie la velocidad turbulenta transversal es muy similar a la velocidad turbulenta horizontal. De esta forma se explica que desarrollen su tendencia en torno a 0.8 y 1.2.

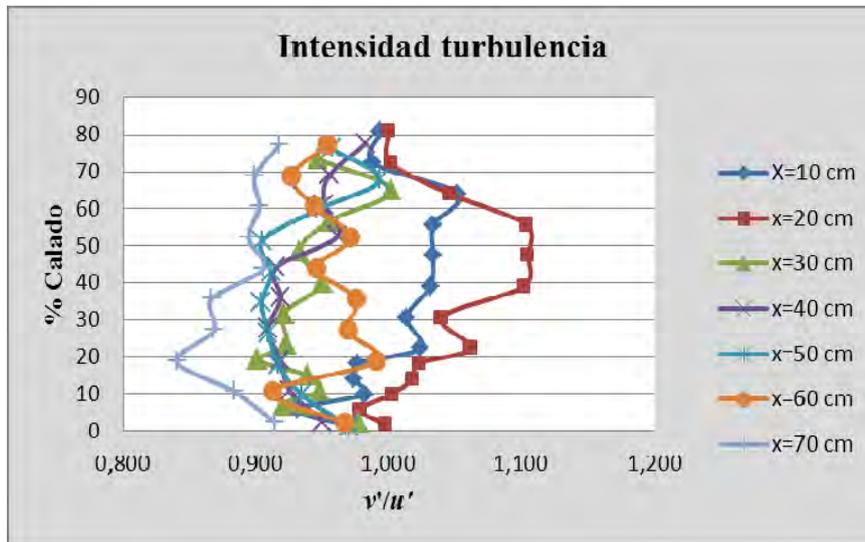


Figura VI.73: Relación entre la velocidad turbulenta transversal y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=30.67$ l/s; $Y= 32$ cm.

En la Figura VI.74 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano vertical y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 32 cm.

Los perfiles experimentan una tendencia que parte desde 0.2 y que va incrementando al aproximarse a la superficie sin embargo se alcanza una mayor variación de las velocidades turbulentas en el perfil situado a 70 cm.

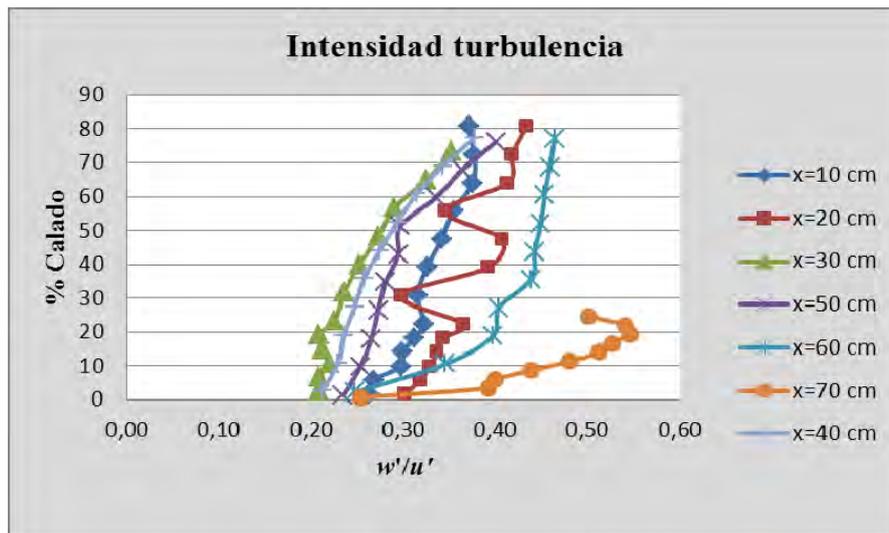


Figura VI.74: Relación entre la velocidad turbulenta vertical y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=30.67$ l/s; $Y= 32$ cm.

La Figura VI.75 muestra los perfiles de la energía cinética turbulenta, referentes a las distintas secciones de estudio.

El comportamiento del fluido deriva en un incremento de la energía cinética producido en el perfil situado a 10 cm de la zona de mayor turbulencia. Desde la tercera sección de estudio en adelante se refleja como gradualmente la energía es disipada en todos los perfiles hasta un mínimo de $0.15 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

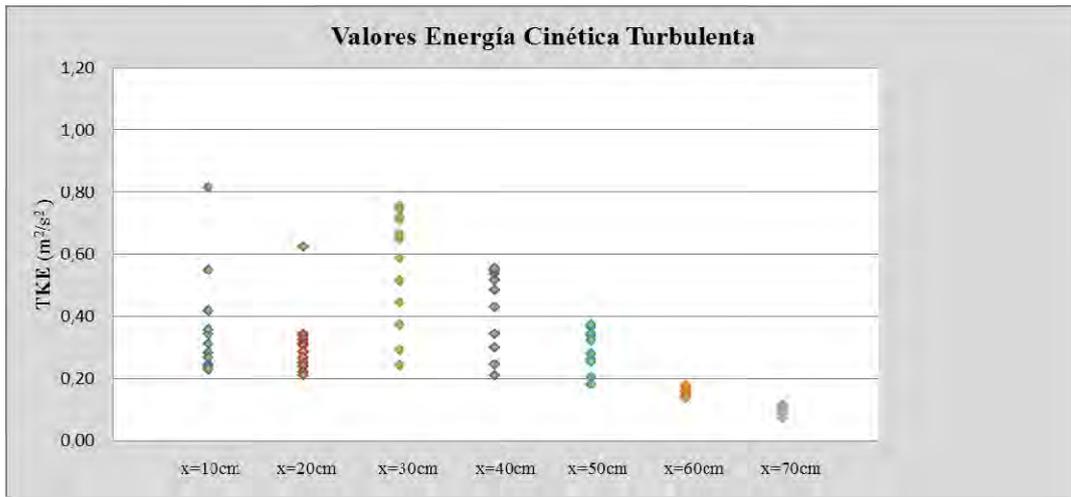


Figura VI.75: Desarrollo de la energía cinética turbulenta para $Q=30.67$ l/s; $Y=32$ cm.

La Figura VI.76 muestra la evolución de la energía cinética turbulenta en los diferentes perfiles a lo largo del cuenco de amortiguación.

Se puede apreciar que los perfiles siguen una distribución lógica de la energía cinética. Partiendo desde el perfil con mayor producción debido a la agitación del fluido provocada por el choque del chorro incidente.

Por encima del resalto sumergido la mayoría de los perfiles evolucionan hacia valores inferiores dado que la disipación energética se produce aguas abajo de la zona de mayor turbulencia hacia un valor más estable, influyendo también la contrapresa formada.

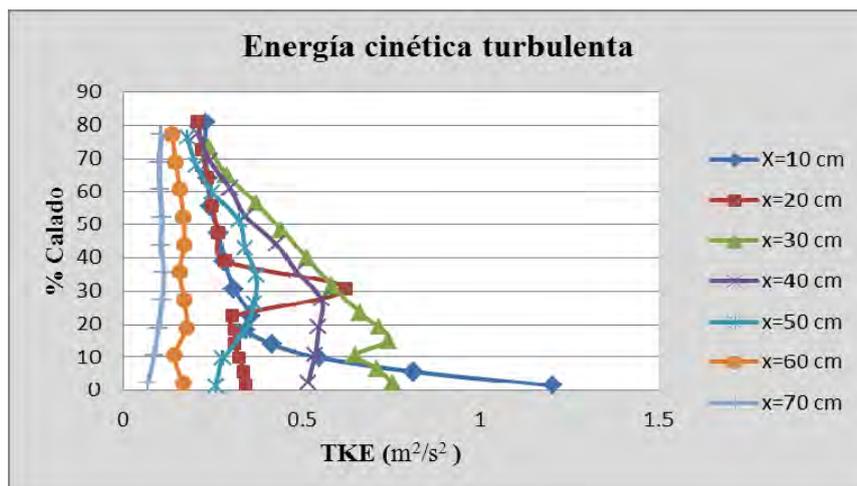


Figura VI.76: Perfiles de energía cinética turbulenta en el cuenco, para $Q=30.67$ l/s; $Y=32$ cm.

Colchón Y=40 cm.

En la Figura VI.77 se puede apreciar la distribución de velocidades horizontales y verticales en las diferentes secciones de estudio, logradas con un colchón de Y= 40 cm.

Con un colchón de 40 cm, cada vez se nota la influencia de la contrapresa para las secciones a partir del perfil situado a 50 cm de la zona de impacto del chorro. Dado que el chorro de fondo desaparece y las velocidades se inclinan hacia valores bajos con respecto a las iniciales. Por lo que no hace falta dividir el cuenco de amortiguación en más secciones de estudio, para concluir que la distribución de velocidades que se consigue es típica de un canal.

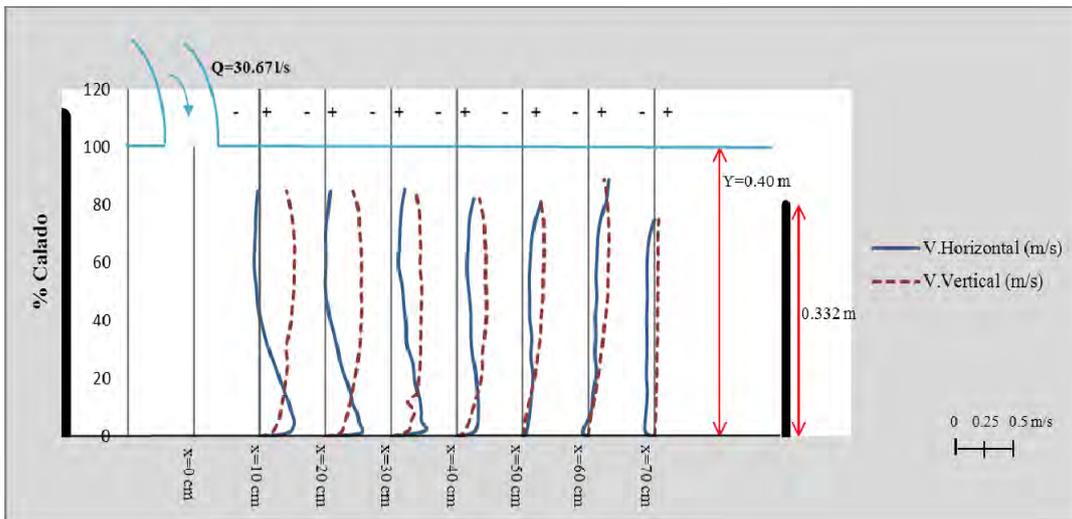


Figura VI.77: Perfiles de velocidad cada 10 cm desde el punto de impacto del chorro, para un caudal de 30.67 l/s e Y=40 cm.

En la Figura VI.78 se presenta la tendencia de las velocidades medias horizontales por separado.

En los primeros perfiles se observa como el chorro de fondo está bien definido consiguiéndose aquí un máximo de velocidad horizontal. Conforme los perfiles se alejan de la zona de impacto van perdiendo velocidad en el fondo pero tienden a sufrir aumentos menos significativos al acercarse a la superficie, debido al choque que se produce entre el fluido aguas abajo y el contraflujo creado por las barreras.

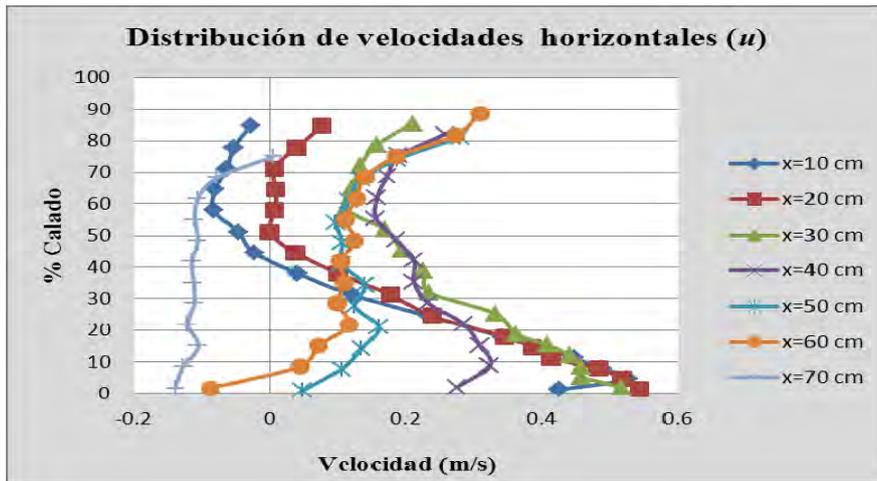


Figura VI.78: Distribución de velocidades medias horizontales dentro del colchón de agua para $Q=30.67$ l/s; $Y=40$ cm.

En la Figura VI.79 se presenta la tendencia de las velocidades medias verticales.

Los perfiles de velocidad vertical en la figura VI.79 al estar desplazados hacia la derecha vemos que experimentan el efecto de avance que produce el resalto sumergido.

Se registra en los primeros perfiles aumentos en la velocidad de 0.55 m/s debido a la fuerza que imprime el chorro al fluido que se encuentra contenido en el cuenco de amortiguación. Por esta razón se observa que durante el transporte hacia secciones más alejadas la fuerza es menor logrando así un decrecimiento en la velocidad vertical.

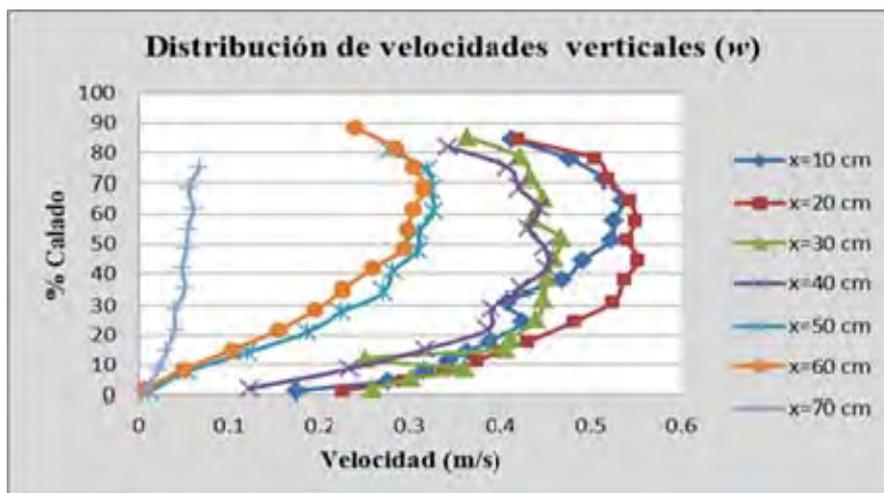


Figura VI.79: Distribución de velocidades medias verticales dentro del colchón de agua para $Q=30.67$ l/s; $Y=40$ cm.

En la Figura VI.80 se grafica la velocidad turbulenta horizontal para distintas secciones de estudio.

Las mayores variaciones de velocidad turbulenta se dan para un 10 % del calado y para los perfiles próximos a la sección mayor turbulencia. En cuanto al resto de perfiles mantienen una distribución en cada columna de agua hacia la superficie con valores de velocidad entre 0 y 0.4 m/s.

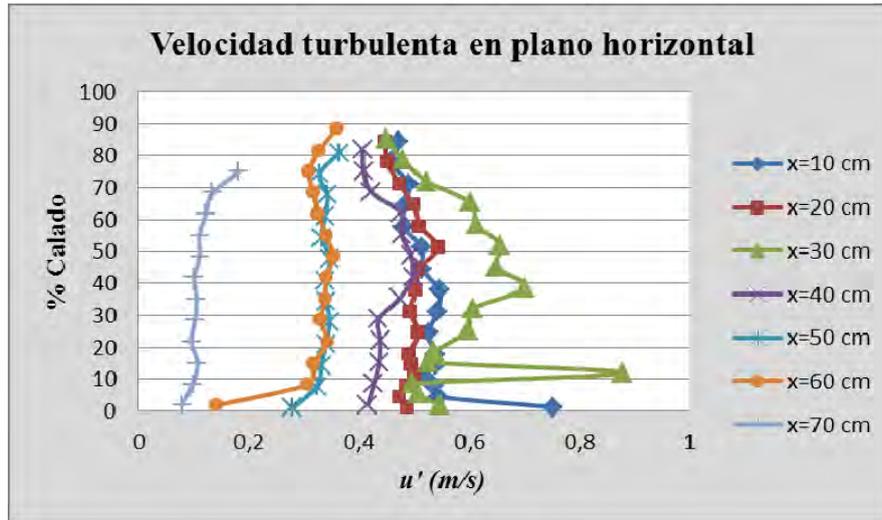


Figura VI.81: Velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=30.67$ l/s; $Y= 40$ cm.

En la Figura VI.81 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano transversal y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 40 cm.

La evolución que siguen los perfiles en cuanto a la relación existente se aprecia que la velocidad turbulenta transversal es mucho mayor en el primer perfil cercano a la zona de mayor turbulencia, ocurre lo contrario para los perfiles más alejados. De manera que los perfiles no sufren cambios notables ya que conforme se aproximan a la superficie tienden a un valor de 1.20.

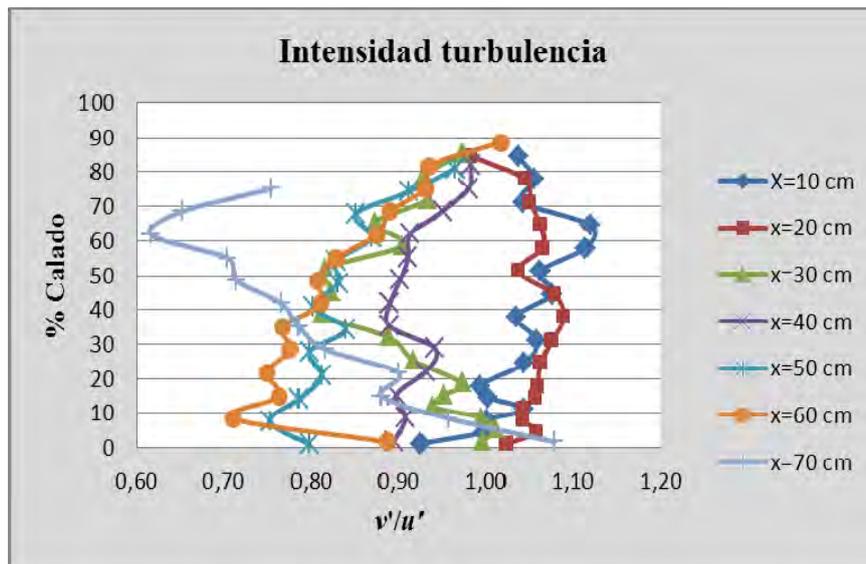


Figura VI.81: Relación entre la velocidad turbulenta transversal y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=30.67$ l/s; $Y= 40$ cm.

En la Figura VI.82 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano vertical con la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 40 cm.

Los perfiles parten desde el fondo y van evolucionando hacia la superficie con valores en torno a 0.2 y 0.8. Tendiendo alcanzar los máximos valores de velocidad turbulenta para los últimos tres perfiles.

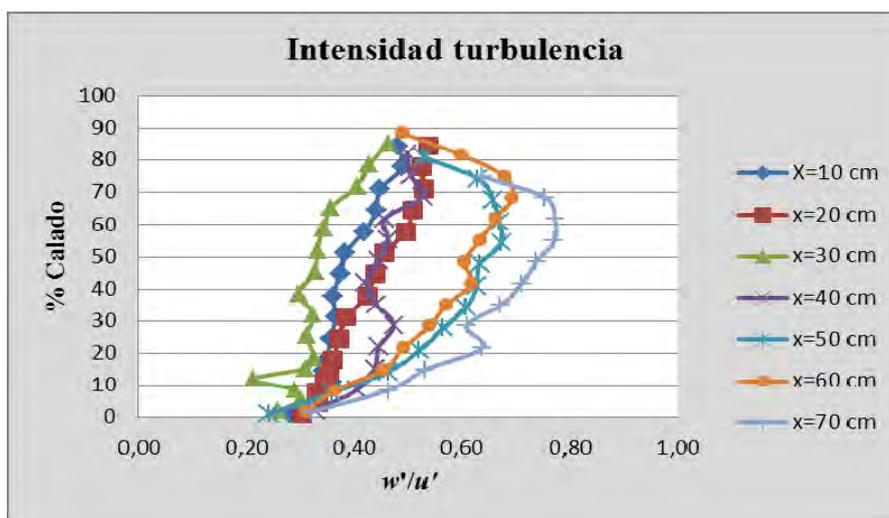


Figura VI.82: Relación entre la velocidad turbulenta vertical y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=30.67$ l/s; $Y= 40$ cm.

La Figura VI.83 muestra los perfiles de la energía cinética turbulenta, referentes a las distintas secciones de estudio.

Para este caso el desarrollo y comportamiento de la energía cinética varía desde el primer perfil hasta el último. Consiguiéndose un máximo de $0.74 \text{ m}^2/\text{s}^2$ situado a 30 cm respecto a la zona de mayor turbulencia por lo que a partir de este perfil la energía decae rápidamente hasta conseguir estabilizar el caudal en el último perfil.

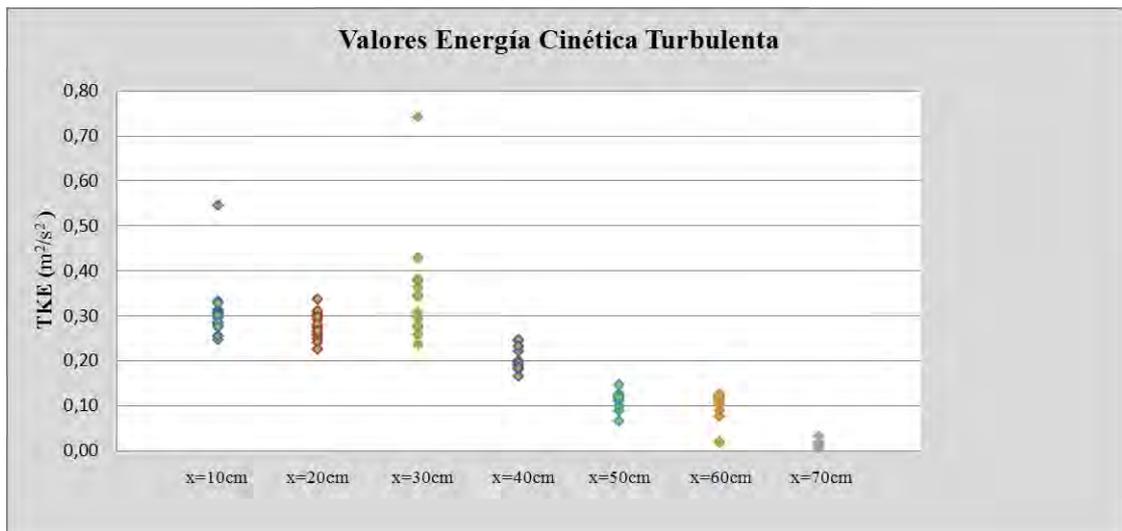


Figura VI.83: Desarrollo de la energía cinética turbulenta para $Q=30.67 \text{ l/s}$; $Y=40\text{cm}$.

La Figura VI.84 muestra la evolución de la energía cinética turbulenta en los diferentes perfiles a lo largo del cuenco de amortiguación.

Vemos que en el perfil $x=30 \text{ cm}$ se alcanza una elevada energía cinética turbulenta cercana al fondo de la solera debido a la transferencia de estado turbulento del fluido que se experimenta en los perfiles más cercanos a la zona de impacto directo. En cuanto a los perfiles posteriores evolucionan al pasar de la zona intermedia hasta la más alejada con valores inferiores conforme se disipa la energía turbulenta.

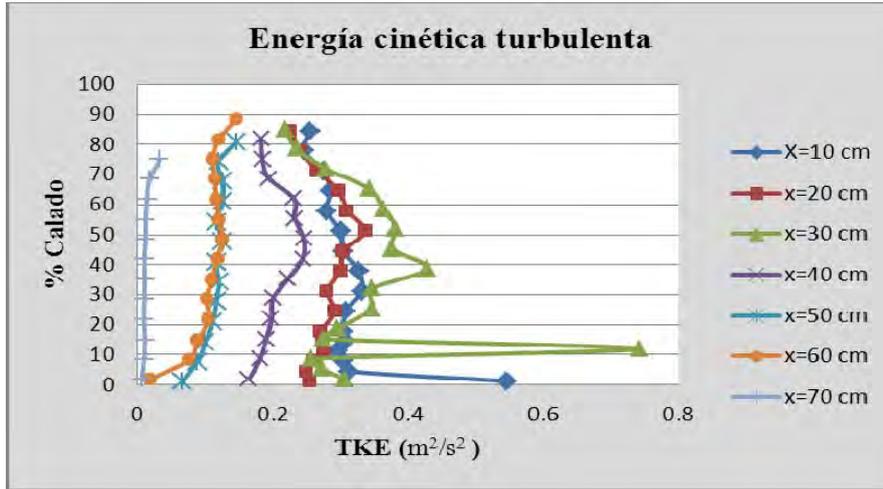


Figura VI.84: Perfiles de energía cinética turbulenta en el cuenco, para $Q=30.67$ l/s; $Y=40$ cm.

Colchón $Y=48.5$ cm.

En la Figura VI.85 se puede apreciar la distribución de velocidades horizontales y verticales en las diferentes secciones de estudio, logradas con un colchón de $Y=48.5$ cm.

Al igual que para el colchón de agua de 40 cm en este caso la distribución de velocidades en las dos primeras secciones se consigue un máximo de velocidad en el fondo sin embargo en el tercer perfil se observa como el chorro de fondo desaparece y la distribución de velocidad en perfiles más alejados adquiere velocidades menores e incluso negativas conforme se acercan a la contrapresa.

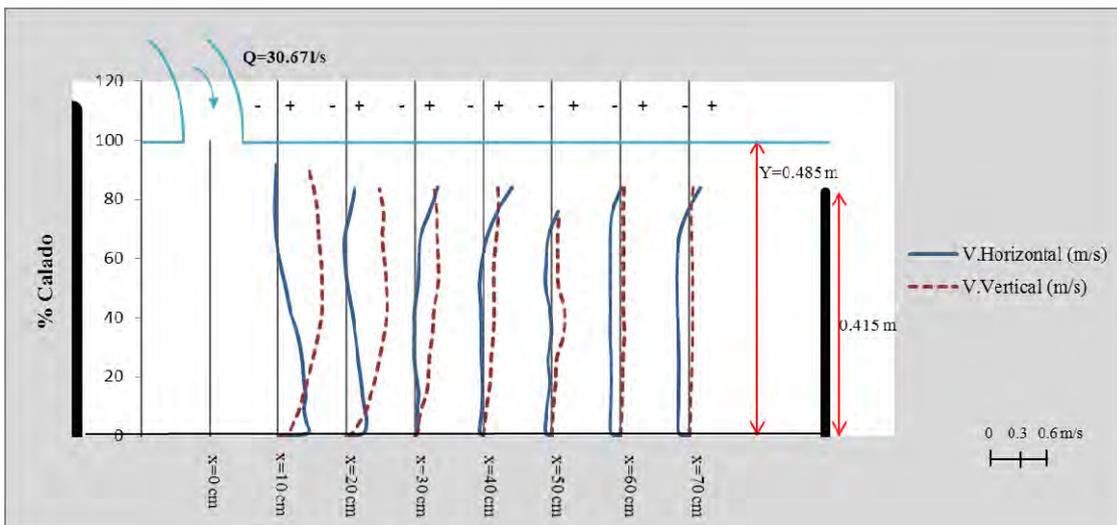


Figura VI.85: Perfiles de velocidad cada 10 cm desde el punto de impacto del chorro, para un caudal de 30.67 l/s e $Y=48.5$ cm.

En la Figura VI.86 se presenta la tendencia de las velocidades medias horizontales.

Se obtiene en el fondo el máximo de 0.4 m/s, asociado al primer perfil que es el que experimenta los efectos del resalto hidráulico. Por otra parte vemos como los cuatro últimos perfiles siguen la tendencia marcada por el tercer perfil al incrementar la velocidad desde el fondo hacia la superficie.

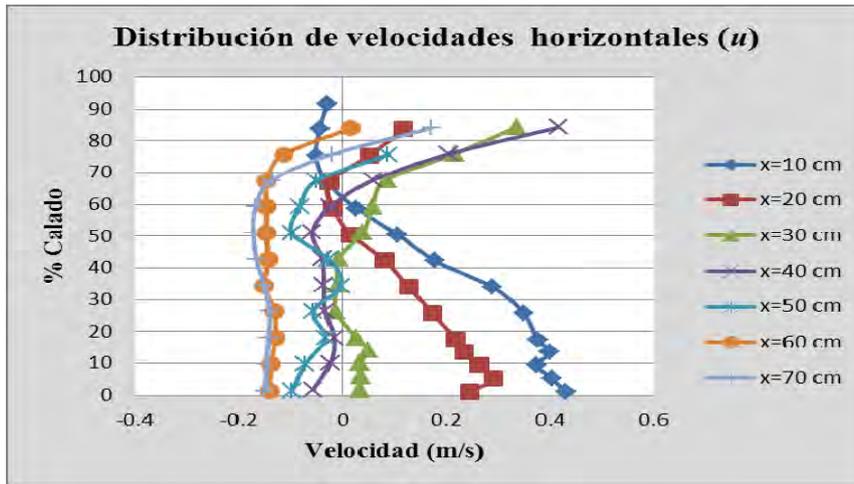


Figura VI.86: Distribución de velocidades medias horizontales dentro del colchón de agua para $Q=30.67$ l/s; $Y=48.5$ cm.

En la Figura VI.87 se presenta la tendencia de las velocidades medias verticales.

Aquí se observa dos tendencias la primera marcada por los dos perfiles con mayores cambios por encontrarse cerca del impacto del chorro. Conforme el fluido se desplaza hacia aguas abajo vemos como los últimos perfiles van perdiendo fuerza y se distribuyen desde el fondo hacia la superficie con valores entre 0 y 0.4 m/s.

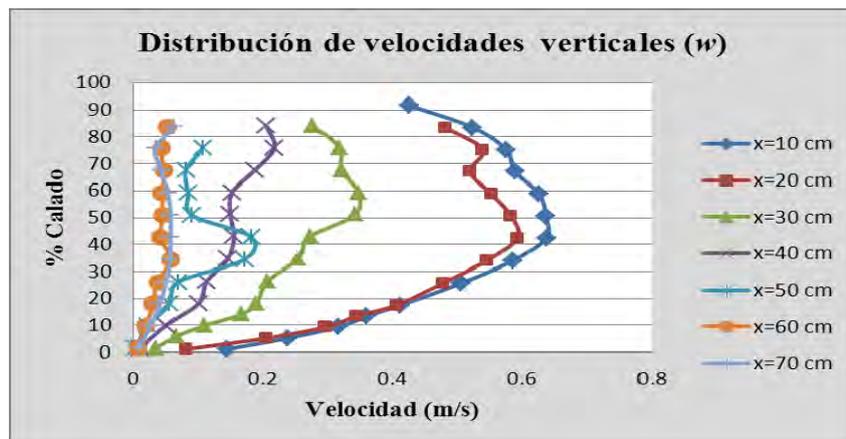


Figura VI.87: Distribución de velocidades medias verticales dentro del colchón de agua para $Q=30.67$ l/s; $Y=48.5$ cm.

En la Figura VI.88 se grafica la velocidad turbulenta horizontal para las distintas secciones de estudio.

Vemos que existe una gran influencia de la contrapresa a partir del perfil 30 cm por lo tanto adquieren una distribución continua hasta el ultimo perfil sin embargo por encima de un 70 % del calado hay incrementos de la velocidad hasta un 0.3 m/s debido a la recirculación del fluido. Al contrario de los primeros perfiles en los que el resalto es débil pero suficiente para producir un máximo de 0.5 m/s.

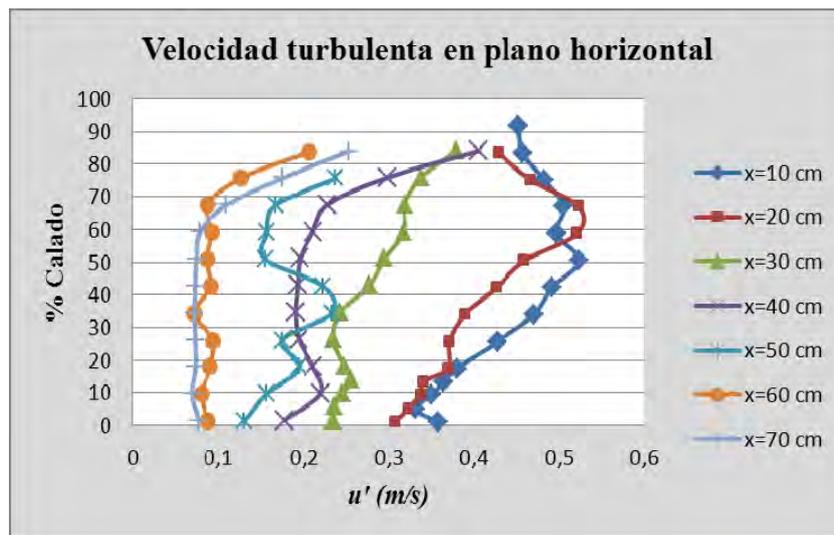


Figura VI.88: Velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=30.67$ l/s; $Y= 48.5$ cm.

En la Figura VI.89 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano transversal y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 48.5 cm.

Los perfiles sufren cambios en la velocidad transversal y horizontal turbulentas desde el fondo y conforme aumenta el calado hacia valores de la relación v'/u' en torno a 0.5 y 1.2.

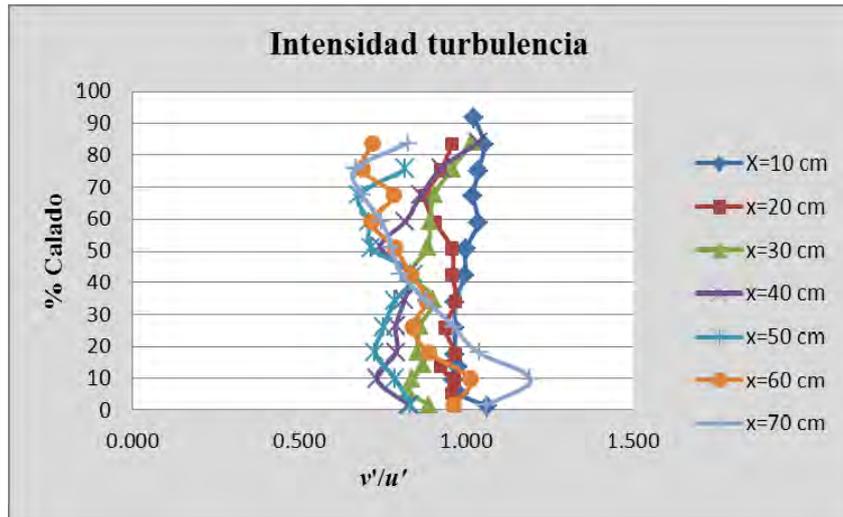


Figura VI.89: Relación entre la velocidad turbulenta transversal y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=30.67$ l/s; $Y= 48.5$ cm.

En la Figura VI.90 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano vertical y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 48.5 cm.

Conforme se acercan a la superficie se nota en los perfiles más alejados como tienden hacia valores inferiores una vez que se alcanzado el máximo de 0.95. En los perfiles más cercanos a la zona de impacto su tendencia es parecida al no haber demasiada diferencia entre las velocidades turbulentas horizontal y vertical.

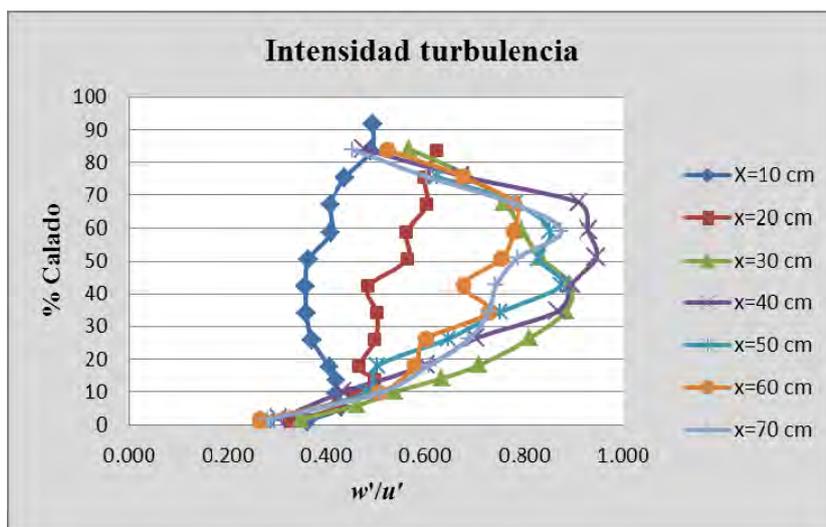


Figura VI.90: Relación entre la velocidad turbulenta vertical y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=30.67$ l/s; $Y= 48.5$ cm.

La Figura VI.91 muestra los perfiles de la energía cinética turbulenta, referentes a las distintas secciones de estudio.

Se observa que al tener un mayor calado, las primeras secciones de estudio adquieren valores elevados en cuanto a la energía cinética turbulenta dada la fuerza que aporta el chorro al fluido. De manera que la energía se mantiene a la mitad de su máximo hasta el cuarto perfil para posteriormente ser disipada en gran medida en los tres últimos perfiles hasta un mínimo de $0.06 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

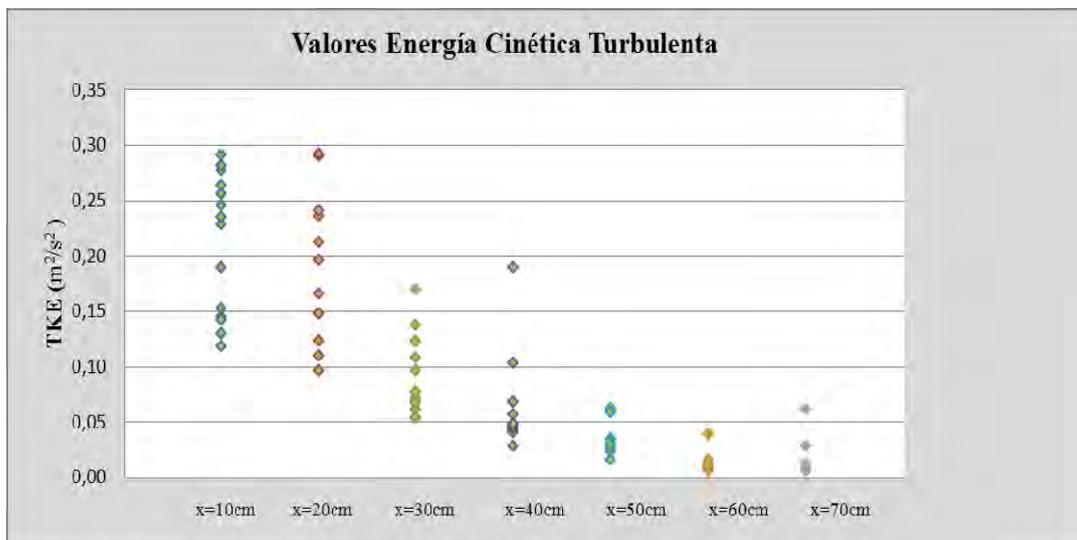


Figura VI.91: Desarrollo de la energía cinética turbulenta para $Q=30.67 \text{ l/s}$; $Y=48.5\text{cm}$.

La Fig. VI.92 muestra la evolución de la energía cinética turbulenta en los diferentes perfiles a lo largo del cuenco de amortiguación.

La energía cinética es transportada por zonas como se puede ver en la figura VI.92. Consiguiéndose agrupar el desarrollo de los dos perfiles cercanos a la zona de mayor turbulencia en los que se encuentra una gran producción de energía por encima del chorro de fondo, posteriormente tenemos una zona de transición con valores inferiores al encontrarse menos agitado el fluido. Por último la zona formada por los perfiles más alejados del punto de impacto en los cuales el chorro de pared pierde intensidad. De tal manera la energía es disipada a lo largo del cuenco de amortiguación.

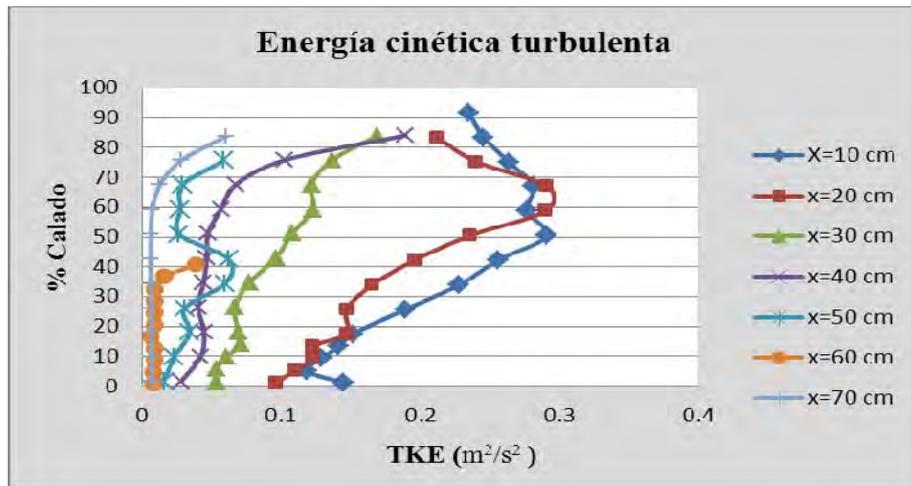


Figura VI.92: Perfiles de energía cinética turbulenta en el cuenco, para $Q=30.67$ l/s; $Y=48.5$ cm.

Colchón $Y=57$ cm.

En la Figura VI.93, se puede apreciar la distribución de velocidades horizontales y verticales en las diferentes secciones de estudio, logradas con un colchón de $Y= 57$ cm.

La distribución de velocidades se ve afectada claramente por las barreras. De manera que para el perfil situado a 30 cm del impacto en adelante se ve como la distribución tanto de los perfiles de velocidades horizontales como verticales siguen un mismo patrón desde el fondo hacia la superficie. Los mayores cambios en cuanto a velocidad se refiere quedan registrados para las primeras secciones de estudio en donde se aprecia una mayor intensidad del chorro de pared.

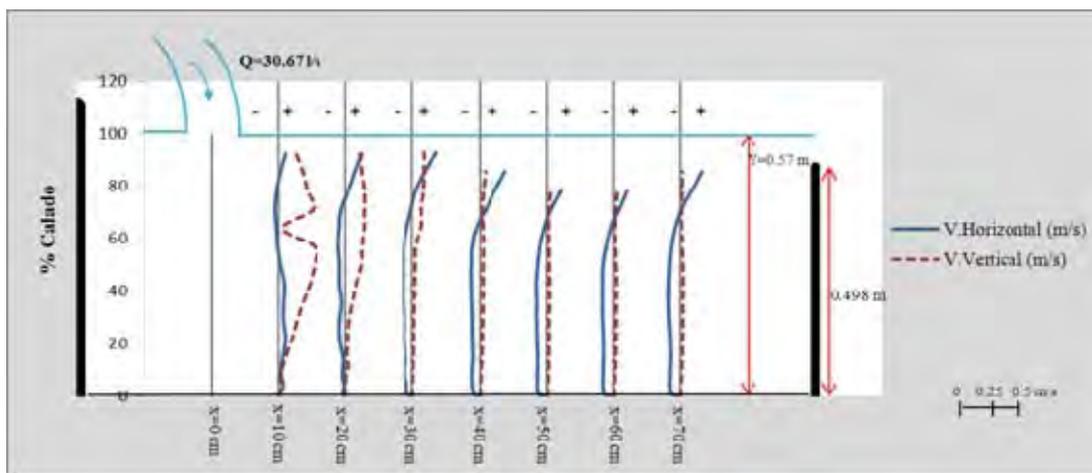


Figura VI.93: Perfiles de velocidad cada 10 cm desde el punto de impacto del chorro, para un caudal de 30.67 l/s e $Y=57$ cm.

En la Figura VI.94 se presenta la tendencia de las velocidades medias horizontales.

En la mayoría de perfiles la velocidad horizontal experimenta un decrecimiento bastante acusado sin embargo por encima de un 70% del calado los perfiles se disparan hacia mayores valores debido al empuje del fluido producido por el efecto rulo del resalto sumergido.

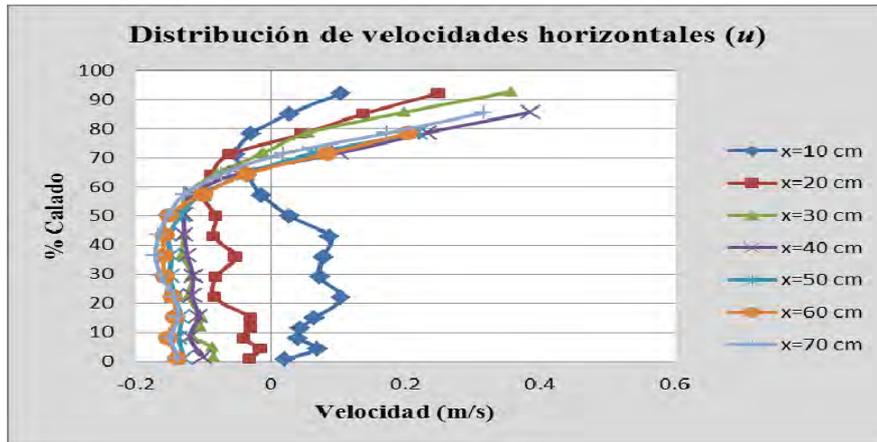


Figura VI.94: Distribución de velocidades medias horizontales dentro del colchón de agua para $Q=30.67$ l/s; $Y=57$ cm.

En la Figura VI.95 se presenta la tendencia de las velocidades medias verticales.

Vemos que las fluctuaciones de velocidad vertical en la figura VI.95 se dan en los perfiles cercanos a la zona de impacto del chorro. Los últimos perfiles siguen un desarrollo muy similar al verse frenado el flujo por la contrapresión y de esta manera se reduce la velocidad. Al relacionar la distribución de velocidad horizontal y vertical vemos que sus perfiles tienden a cruzarse conforme se acercan a la superficie buscando una estabilidad.

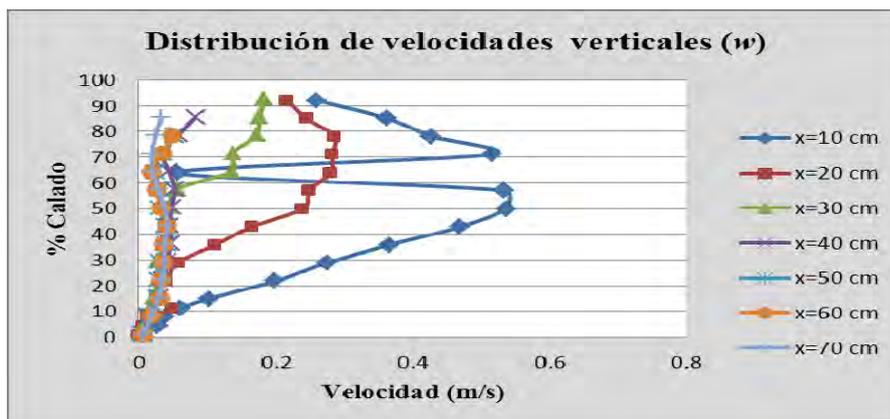


Figura VI.95: Distribución de velocidades medias dentro del colchón de agua para $Q=30.67$ l/s; $Y=57$ cm.

En la Figura VI.96 se grafica la velocidad turbulenta horizontal para las distintas secciones de estudio.

Vemos que los perfiles parten desde el fondo con mínimos de velocidad pero conforme avanzan con el calado evolucionan con incrementos de velocidad los cuales son más significativos para la primera sección. De manera que a partir del perfil 40cm en adelante las partículas del flujo son frenadas por influencia del contraflujo creado por las barreras reflejando decrecimiento de la velocidad turbulenta hasta un 50% del calado.

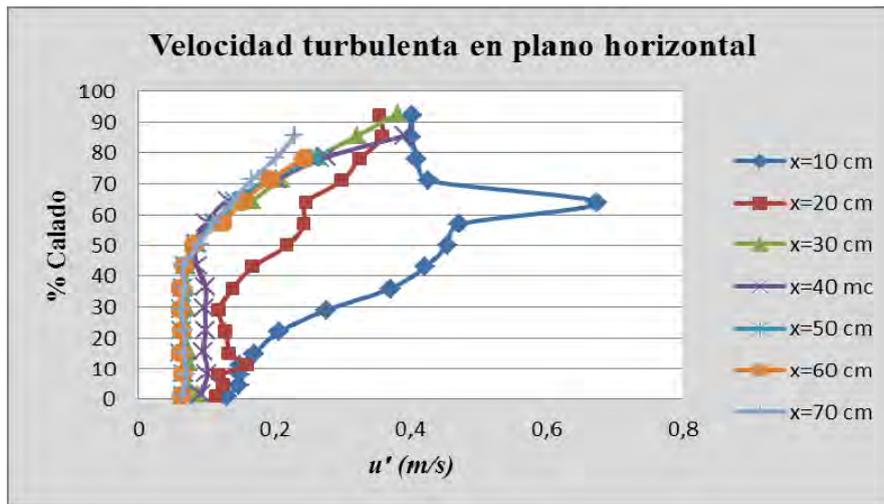


Figura VI.96: Velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=30.67$ l/s; $Y= 57$ cm.

En la Figura VI.97 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano transversal y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 55 cm.

De forma general se aprecia que la distribución que siguen los perfiles es similar conforme se acercan a la superficie incluso tienden hacia valores comprendidos entre 0.5 y 1.19, esto se debe a que no existen cambios drásticos en la velocidad turbulenta transversal y la velocidad turbulenta horizontal.

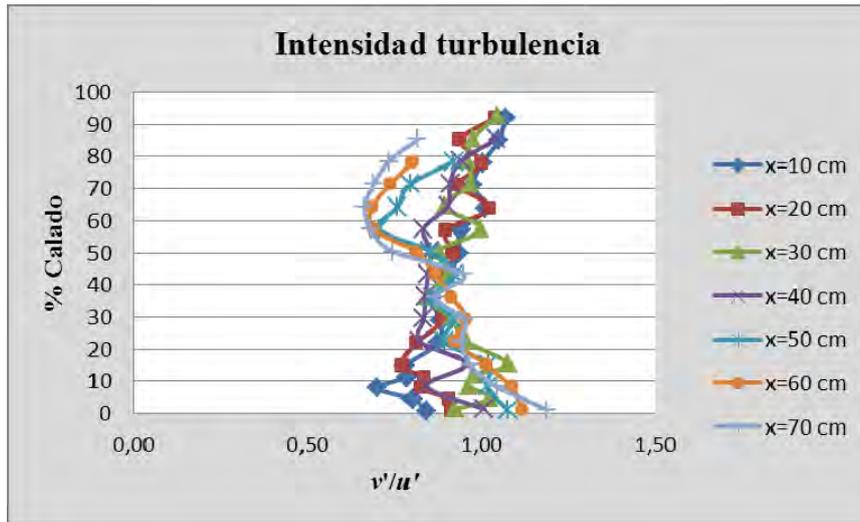


Figura VI.97: Relación entre la velocidad turbulenta transversal y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=30.67$ l/s; $Y= 57$ cm.

En la Figura VI.97 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano vertical con la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 55 cm.

Se aprecia un desarrollo guiado a incrementar desde el fondo hasta alcanzar un valor máximo de 1.03. Conforme se acercan a la superficie los perfiles tienden adquirir menores valores marcados por un mínimo de 0.2.

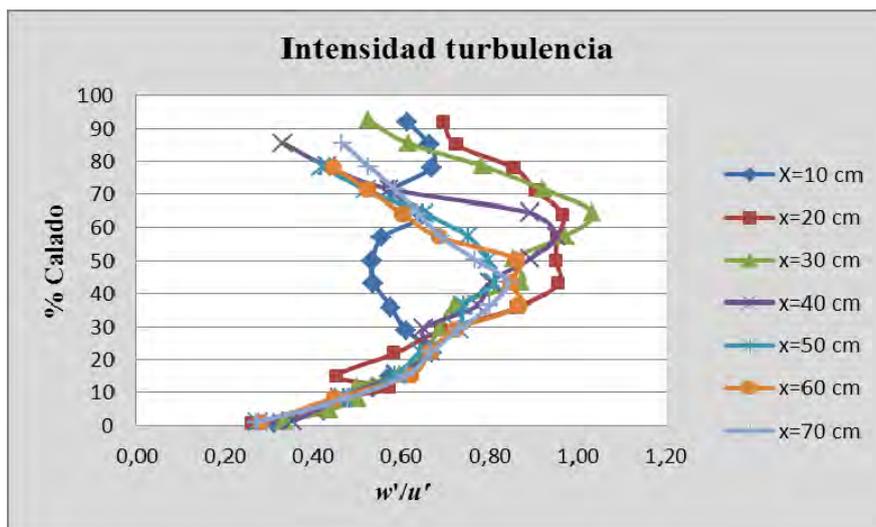


Figura VI.98: Relación entre la velocidad turbulenta vertical y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=30.67$ l/s; $Y= 57$ cm.

La Figura VI.99 muestra los perfiles de la energía cinética turbulenta, referentes a las distintas secciones de estudio.

Como vemos la disipación de energía desde el primer perfil hasta el último es proporcional a la energía almacenada en el fluido, tal manera que el cuenco de amortiguación cumple su principal función y el comportamiento del fluido es el adecuado para permitir la restitución del fluido más estable al cauce.

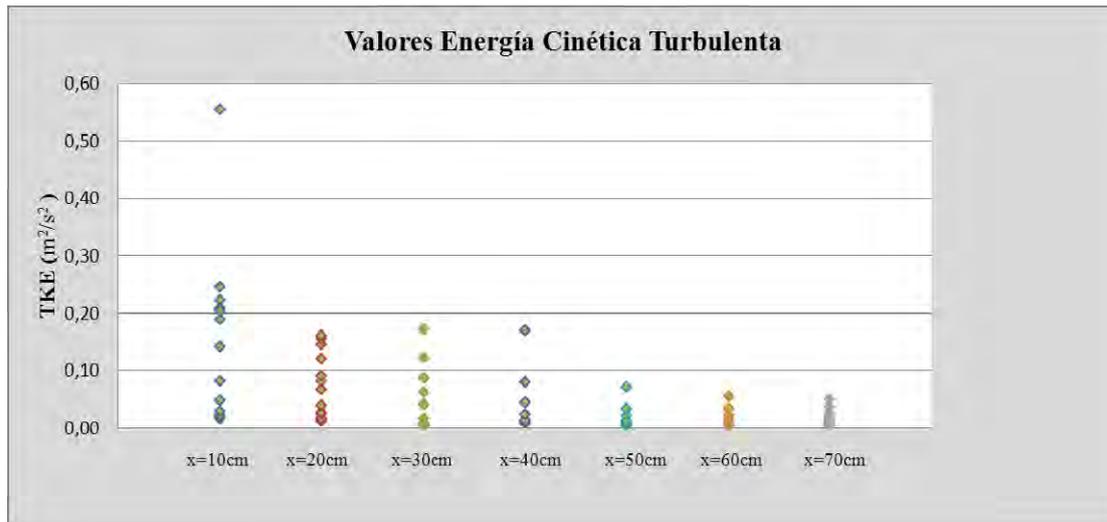


Figura VI.99: Desarrollo de la energía cinética turbulenta sin considerar el calado.

La Fig. VI.100 muestra la evolución de la energía cinética turbulenta a lo largo del cuenco de amortiguación.

Podemos apreciar que se alcanza la máxima producción de energía claramente en la sección cercana a la zona de impacto del chorro, obteniéndose un máximo en energía cinética turbulenta de $0.55\text{m}^2/\text{s}^2$ para un 64.04% del calado. Este proceso ocurre gracias a que la capa límite se vuelve turbulento y a la acción del resalto sumergido al causar la fluctuación de velocidades turbulentas. Se observa que conforme se pasa el 60% del calado los últimos perfiles tienden a incrementar en menor medida su energía cinética puede ser a consecuencia de que aún se capta restos del flujo turbulento.

Conforme se van alejando de la zona de mayor turbulencia el chorro de pared de fondo va perdiendo intensidad de manera que se llega a disipar la energía escala por escala hasta un valor de $0.05\text{ m}^2/\text{s}^2$ perteneciente a la sección $x=70\text{ cm}$.

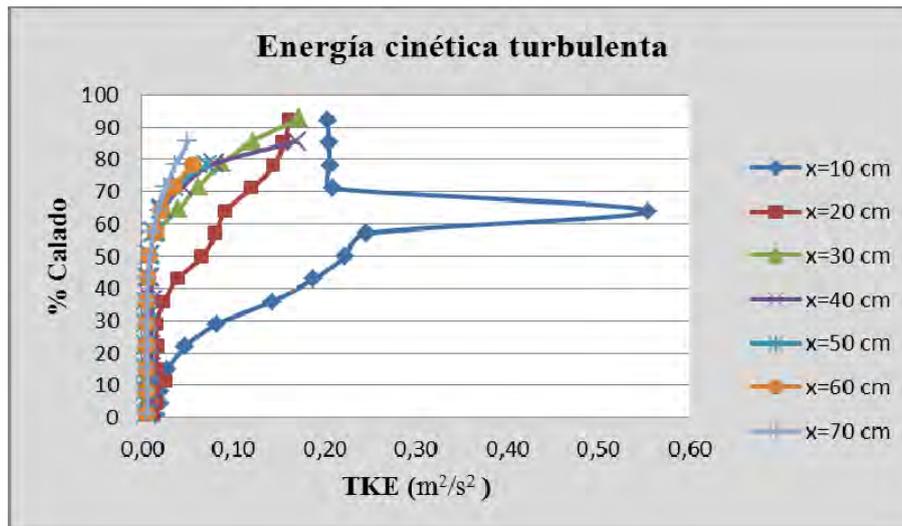


Figura VI.100: Perfiles de energía cinética turbulenta en el cuenco, para $Q=30.67$ l/s; $Y=57$ cm.

VI.1.3. Caudal $Q=45.31$ l/s

Colchón $Y=15$ cm.

En la Figura VI.101 se puede apreciar la distribución de velocidades horizontales y verticales en las diferentes secciones de estudio, logradas con un colchón de $Y=15$ cm.

Se observa en las secciones intermedias que se incrementa la velocidad hasta un 20% para después decaer relativamente hacia la superficie. En cuanto a las últimas secciones de estudio tienden a una distribución de velocidades continua conforme se acercan a la contrapresa.

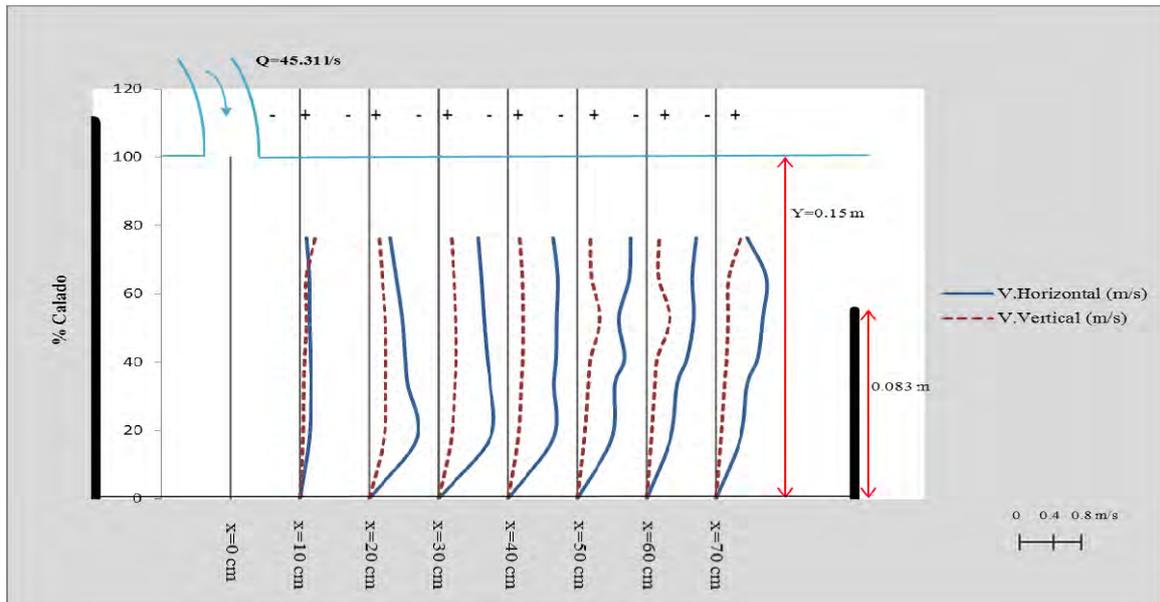


Figura VI.101: Perfiles de velocidad cada 10 cm desde el punto de impacto del chorro, para un caudal de 45.31 l/s e Y=15 cm.

En la Figura VI.102 se grafica la tendencia de las velocidades medias horizontales.

El primer perfil registra los valores de velocidad más bajos a consecuencia de que el chorro genera demasiadas burbujas en dicha zona. Al conseguir que el colchón de agua se defina aguas abajo vemos como el resto de perfiles adquieren aumentos en la velocidad horizontal cercanos al fondo.

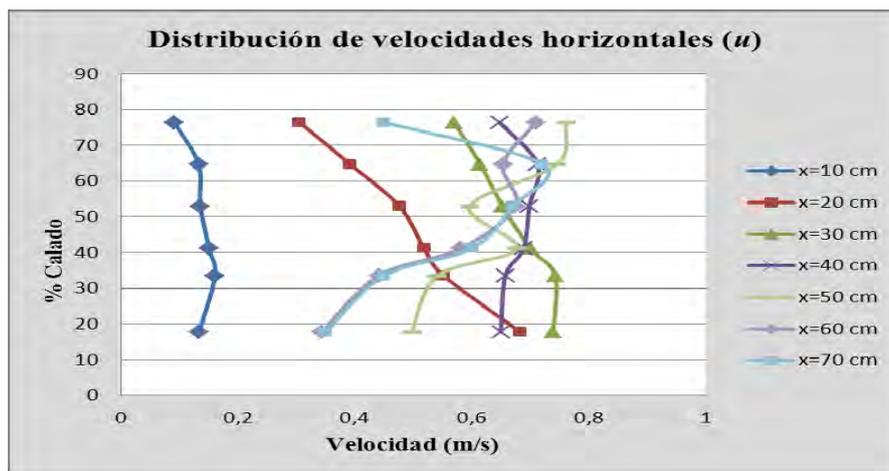


Figura VI.102: Distribución de velocidades medias horizontales dentro del colchón de agua para Q=45.31 l/s; Y=15cm.

En la Figura VI.103 se grafica la tendencia de las velocidades medias verticales.

El mismo proceso se repite para la distribución de velocidades verticales al experimentar mayores cambios conforme el flujo es transportado aguas abajo del impacto del chorro ya que en el último perfil es donde se registra un máximo de 0.36 m/s cercano a la superficie influenciado por el fluido vertiente en la contrapresa.

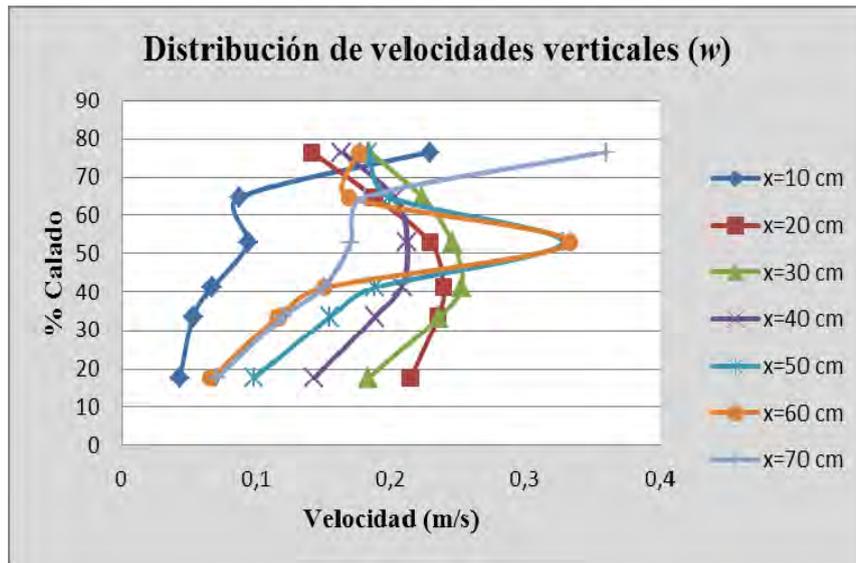


Figura VI.103: Distribución de velocidades medias verticales dentro del colchón de agua para $Q=45.31$ l/s; $Y=15$ cm.

En la Figura VI.104 se grafica la velocidad turbulenta horizontal para las distintas secciones de estudio.

En general la tendencia seguida por los perfiles es similar de manera que la velocidad turbulenta varía entre 0.2 y 0.35 m/s. Implicando velocidades máximas en el fondo y los mínimos conforme aumenta el calado debido a las perturbaciones producidas por el resalto sumergido.

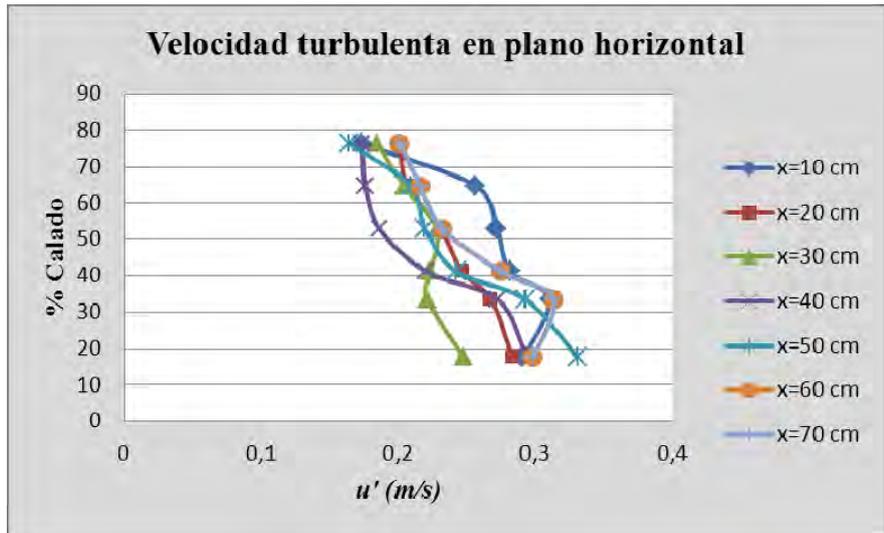


Figura VI.104: Velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=45.31$ l/s; $Y=15$ cm.

En la Figura VI.105 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano transversal y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 15 cm.

Los primeros perfiles adquieren la tendencia de agruparse dado que la relación existente entre velocidad turbulenta transversal y horizontal es muy similar. De tal forma que los perfiles toman valores comprendidos entre 0.60 y 0.80.

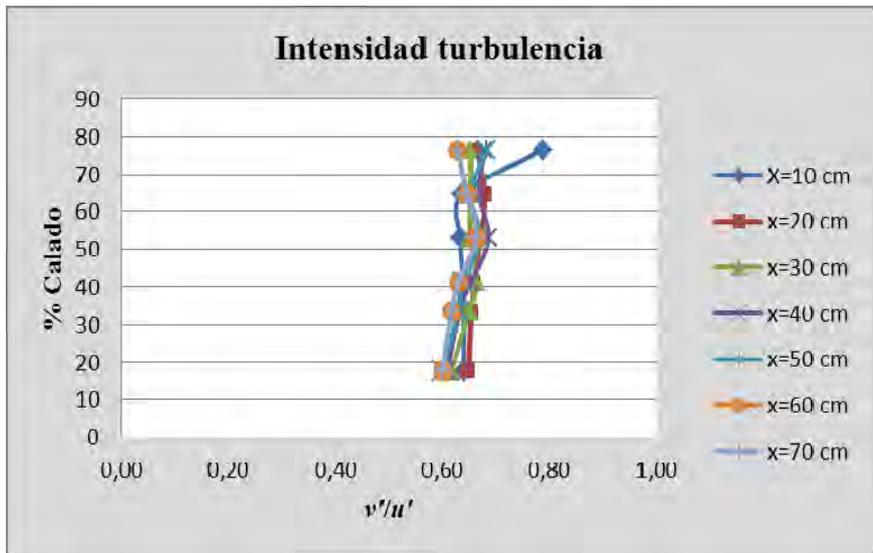


Figura VI.105: Relación de velocidad turbulenta transversal y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=45.31$ l/s; $Y=15$ cm.

En la Figura 106 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano vertical y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 15 cm.

De la misma forma el máximo en cuanto a la relación de velocidades turbulentas w'/u' se logra para el perfil x10 cm. El desarrollo del resto de perfiles varía hacia la superficie con valores entre 0.2 y 0.4.

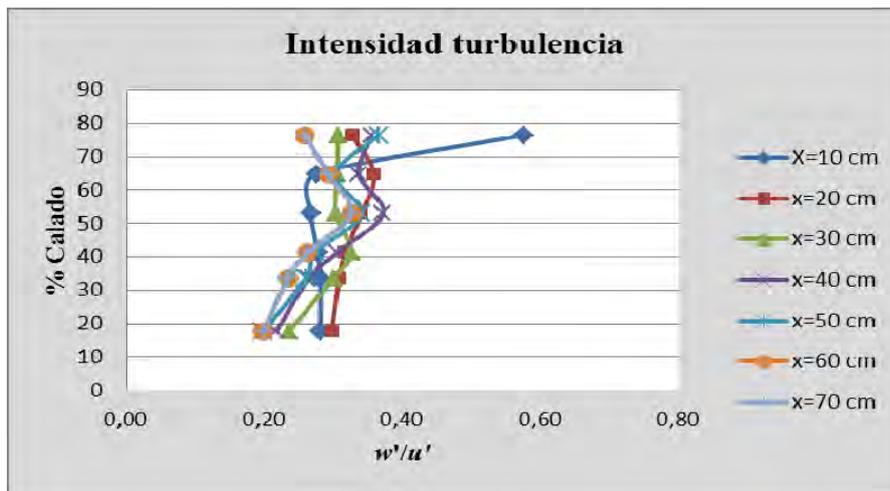


Figura VI.106: Relación de velocidad turbulenta vertical y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=45.31$ l/s; $Y=15$ cm.

La Figura VI.107, muestra los valores de los perfiles de la energía cinética turbulenta referentes a las distintas secciones de estudio.

Se puede apreciar que los perfiles con mayor energía cinética turbulenta se encuentran a 10 y 50 cm de la zona de incidencia. De manera que los perfiles posteriores alcanzan un desarrollo variable con una $TKE < 0.07$ sin lograr disipar la energía en gran medida debido a que el fluido se encuentra muy agitado.

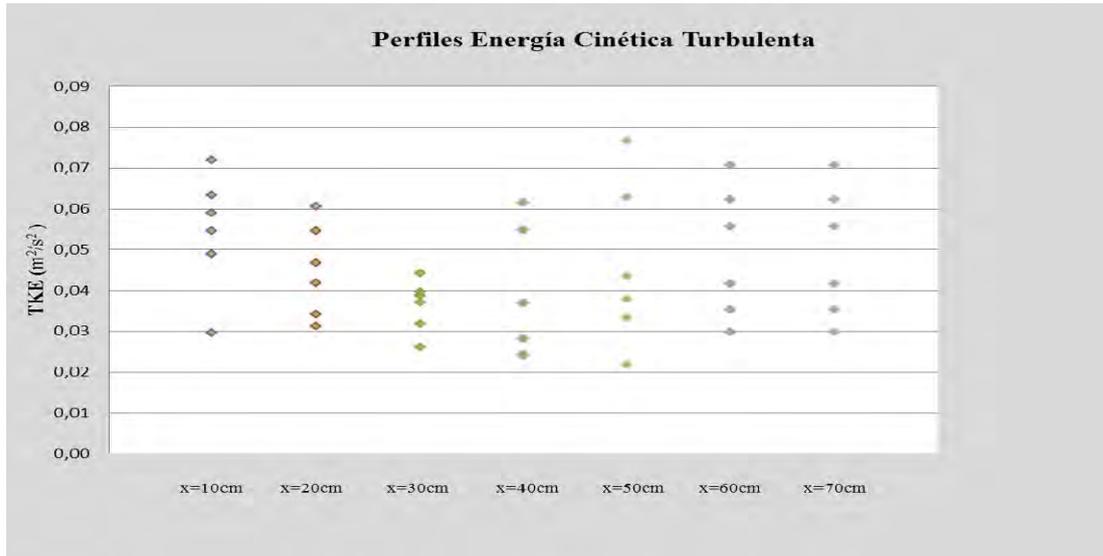


Figura VI.107: Desarrollo de la energía cinética turbulenta para $Q=45.31$ l/s; $Y=15$ cm.

La Figura VI.108 muestra la evolución de la energía cinética turbulenta en los diferentes perfiles a lo largo del cuenco de amortiguación.

La gran mayoría de los perfiles presentan una intensidad parecida a lo largo del cuenco amortiguador y par un colchón de 15 cm. De tal forma que el flujo turbulento actúa en mayor medida para el perfil situado a 50 cm generando un punto de máxima energía cinética turbulenta. La disipación de energía cinética se produce desde $0.08 \text{ m}^2/\text{s}^2$ hacia valores de $0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

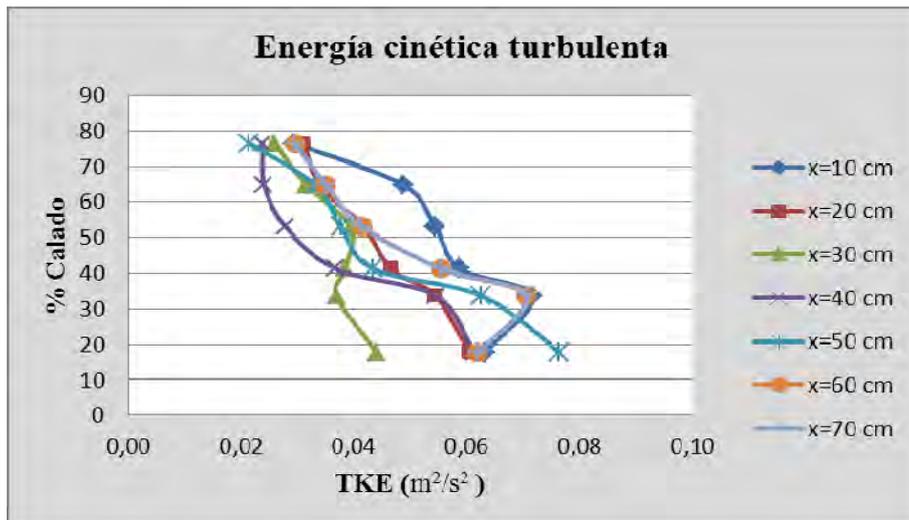


Figura VI.108: Perfiles de energía cinética turbulenta en el cuenco, para $Q=45.31$ l/s; $Y=15$ cm.

Colchón Y=25 cm.

En la Figura VI.109 se puede apreciar la distribución de velocidades horizontales y verticales en las diferentes secciones de estudio, logradas con un colchón de Y= 25 cm.

Dado que se trata de flujo gradualmente variado vemos como para un 15% del caldo se produce incrementos de velocidad horizontal en las tres últimas secciones. Al no encontrarse bien definido el resalto sumergido en las secciones cercanas al chorro con una gran producción de burbujas, implica una distribución de velocidades desigual desde el fondo hacia la superficie.

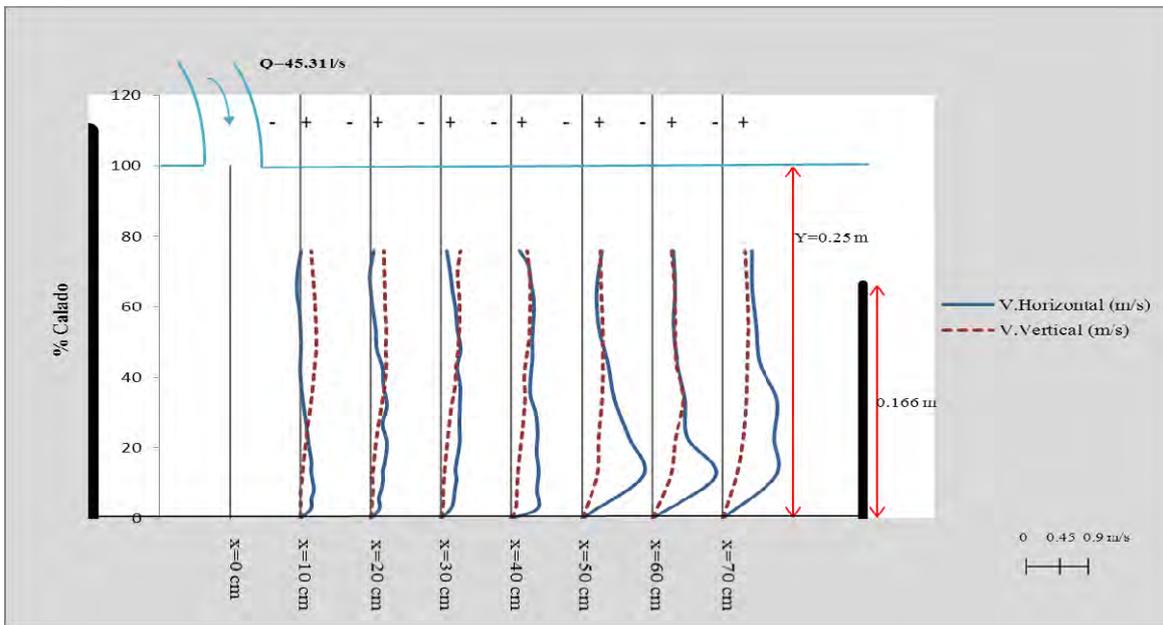


Figura VI.109: Perfiles de velocidad cada 10 cm desde el punto de impacto del chorro, para un caudal de 45.31 l/s e Y=25cm.

En la Figura VI.110 se grafica la tendencia de las velocidades medias horizontales.

En la zona cercana a la solera se registra un máximo de 0.9 m/s, posteriormente los perfiles continúan con valores inferiores. Por el contrario los perfiles más alejados siguen una evolución en toda la columna de agua que difiere con valores de hasta 0.2 m/s.

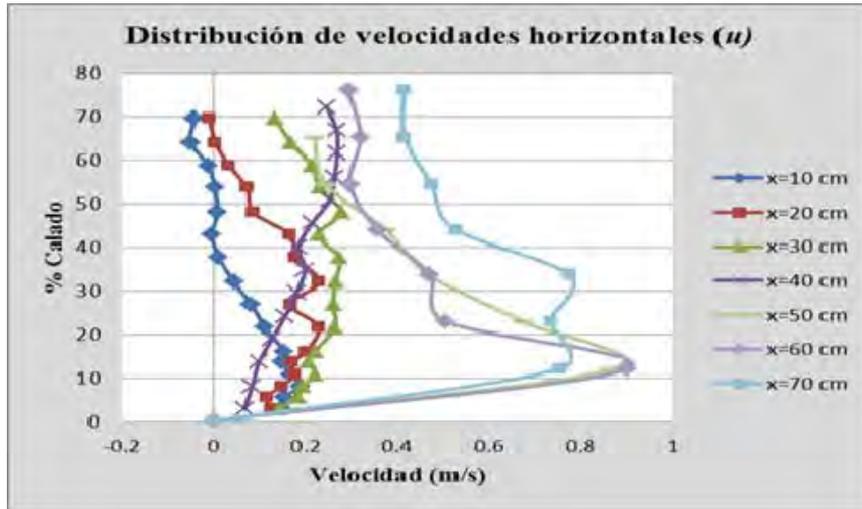


Figura VI.110: Distribución de velocidades medias horizontales dentro del colchón de agua para $Q=45.31$ l/s; $Y=25$ cm.

En la Figura VI.111 se grafica la tendencia de las velocidades medias verticales.

En este caso los incrementos de velocidad vertical se experimentan para perfiles cercanos a la contrapresa, alcanzándose 0.45 m/s gracias al movimiento del flujo turbulento hacia dichas zonas, sin embargo la tendencia en los mismos perfiles presenta pocos cambios desde el fondo hasta el 70 % del calado.

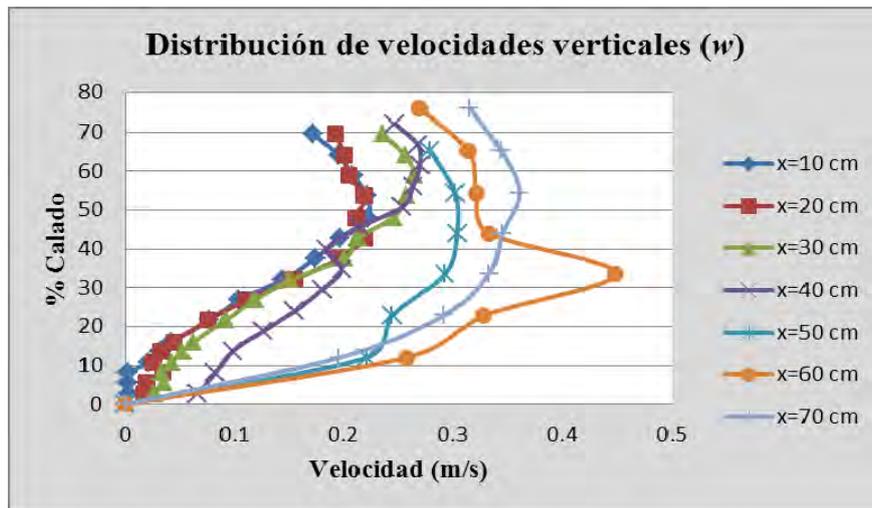


Figura VI.111: Distribución de velocidades medias verticales dentro del colchón de agua para $Q=45.31$ l/s; $Y=25$ cm.

En la Figura VI.112 se grafica la velocidad turbulenta horizontal para las distintas secciones de estudio.

Se observa que la velocidad turbulenta que se registra en las diferentes secciones tienen como origen 1.5 m/s por lo que al desplazarse a la superficie su velocidad disminuye sobretodo para el perfil situado más cerca de la zona de mayor turbulencia. Para los últimos perfiles las velocidades que se desarrollan son inferiores.

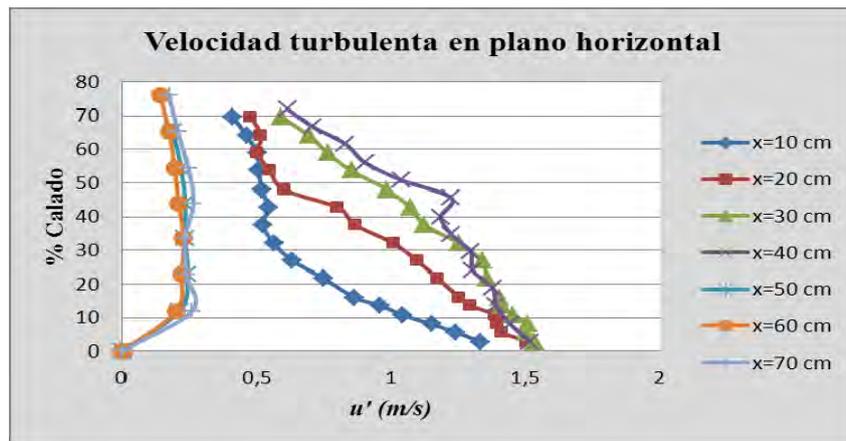


Figura VI.112: Velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=45.31$ l/s; $Y= 25$ cm.

En la Figura VI.113 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano transversal y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 25 cm.

Como se observa los perfiles se dividen en dos grupos. El primero formado por los perfiles próximos a la zona de impacto del chorro representados por los máximos valores de la relación v'/u' la cual varía entre 0.8 y 1. Finalmente los últimos perfiles presentan una relación $v'/u' < 0.8$.

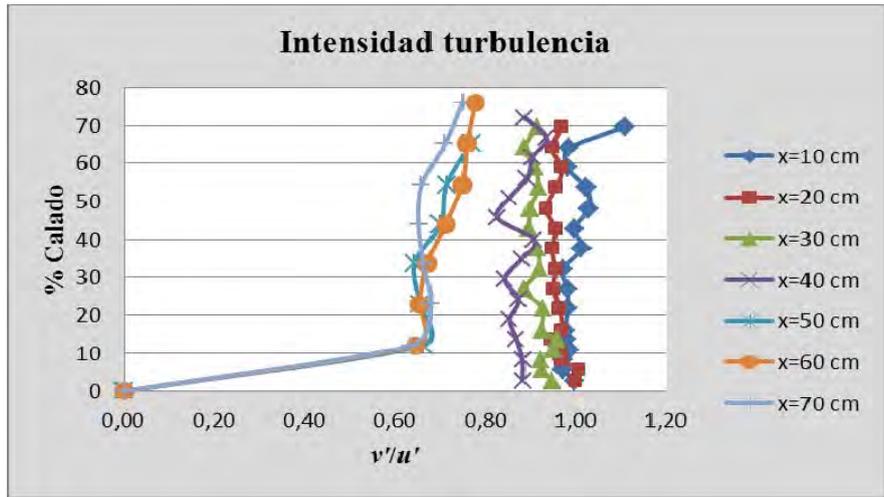


Figura VI.113: Relación de velocidad turbulenta transversal y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=45.31$ l/s; $Y= 25$ cm.

En la Figura VI.114 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano vertical y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 25 cm.

Al contrario que la relación mostrada por v'/u' , para este caso los perfiles comprendidos entre $x=10$ y $x=40$ cm parten desde un valor de 0.2 y van evolucionando en torno al mismo. El resto de perfiles sufren fluctuaciones significativas en las velocidades turbulentas por lo que cada vez la relación w'/u' es mayor.

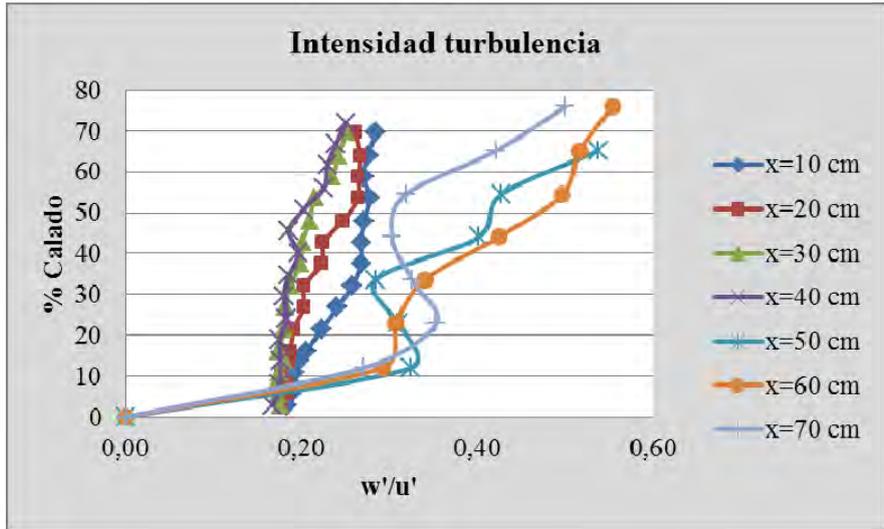


Figura VI.114: Relación de velocidad turbulenta vertical y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=45.31$ l/s; $Y= 25$ cm.

La Figura VI.115 muestra los valores de los perfiles de la energía cinética turbulenta referentes a las distintas secciones de estudio.

Se observa que al tener un mayor calado, la energía cinética turbulenta que se deriva del flujo turbulento es suficientemente elevada como para llegar hasta la sección situada a 40 cm con la misma fuerza. Del mismo modo se disipa demasiado rápido, por lo que puede ser necesario introducir secciones intermedias de estudio para conocer por que se genera una reducción tan brusca.

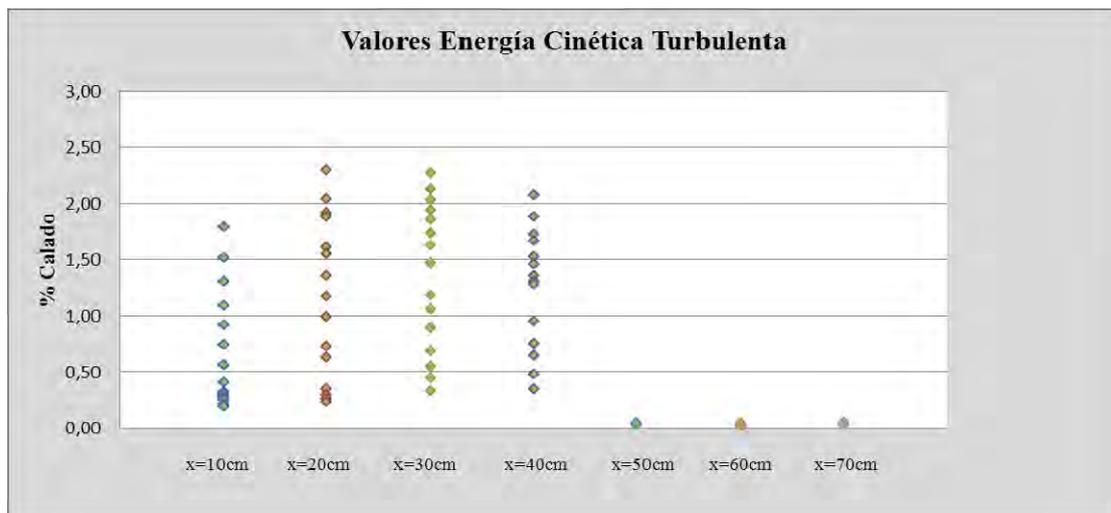


Figura VI.115: Desarrollo de la energía cinética turbulenta para Q=45.31 l/s; Y= 25 cm.

La Figura VI.116 muestra la evolución de la energía cinética turbulenta en los diferentes perfiles a lo largo del cuenco de amortiguación.

Como se esperaba la mayor producción de energía cinética turbulenta se produce en las primeras secciones debido a la cercanía con la zona que imprime una gran turbulencia al fluido por tanto en el fondo se consigue un máximo y es donde se aprecian mayores cambios. Conforme los perfiles se alejan y avanzan a la superficie estos perfiles pierden intensidad tendiendo hacia valores $< 2.5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ dado que el fluido se encuentra menos agitado.

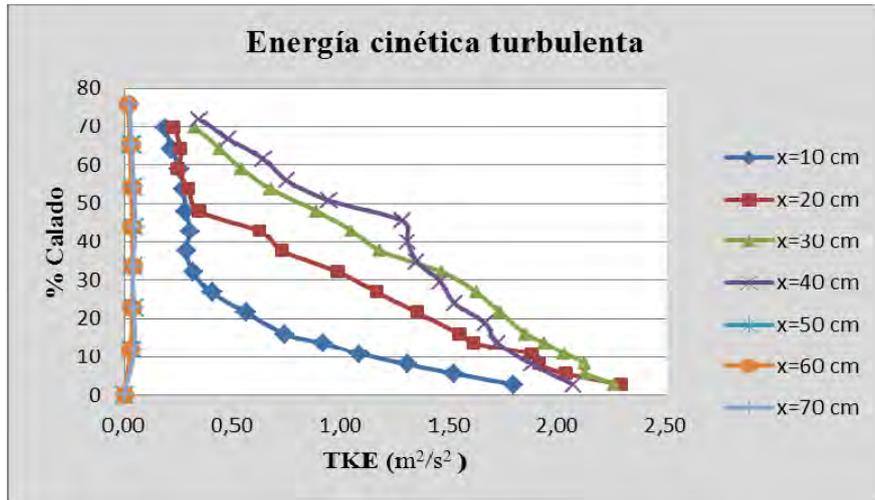


Figura VI.116: Perfiles de energía cinética turbulenta en el cuenco, para $Q=45.31$ l/s; $Y=25$ cm.

Colchón $Y=33.5$ cm.

En la Figura VI.116 se puede apreciar la distribución de velocidades horizontales y verticales en las diferentes secciones de estudio, logradas con un colchón de $Y=33.5$ cm.

La distribución de velocidades es semejante a las analizadas para el colchón de 25 cm, sin embargo en las primeras secciones no llegan a presentar del todo el comportamiento esperado por el flujo turbulento. No obstante a partir de la sección 30 cm se acentúa el efecto del resalto al producir un mayor chorro de fondo. Para las secciones situadas a 50 y 60 cm se nota la influencia de la contrapresa al causar por encima de un 10 % de calado valores negativos en la velocidad horizontal. En cuanto a la distribución de las velocidades verticales vemos que varía muy poco en cada sección de estudio.

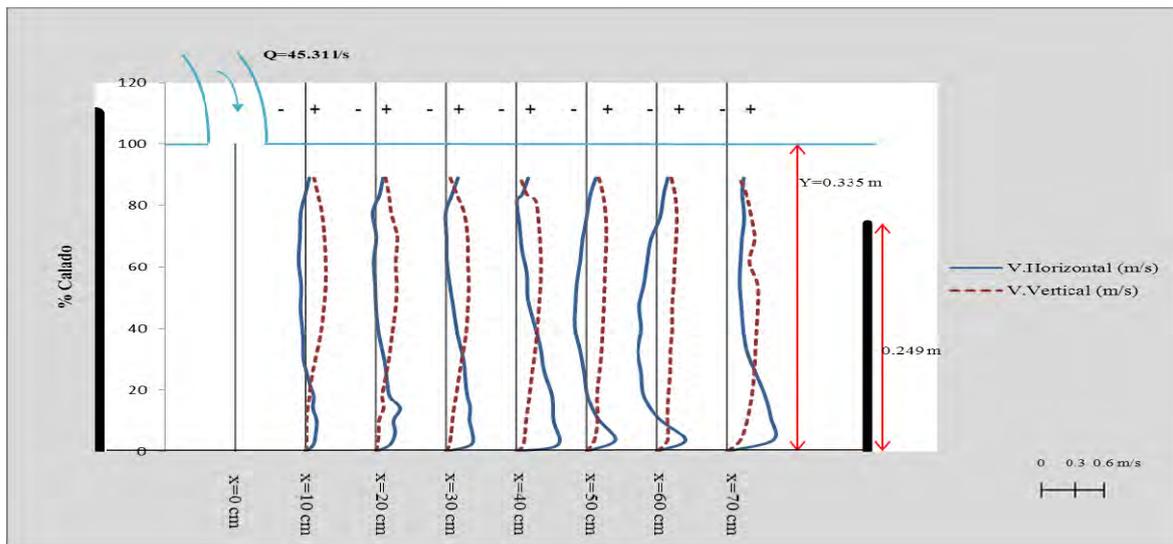


Figura VI.116: Perfiles de velocidad cada 10 cm desde el punto de impacto del chorro, para un caudal de 45.31 l/s e $Y=33.5$ cm.

En la Figura VI.117 se grafica la tendencia de las velocidades medias horizontales.

La relación con los perfiles de velocidad horizontal y vertical resulta ser inversa ya que el máximo de velocidad horizontal se tiene en zonas próximas a la solera con un valor de 0.649 m/s correspondiente a la sección x70 cm. Por lo que se visualiza que entre el primer perfil y el último, persiste un desarrollo de valores intermedios guiados hacia velocidades negativas influenciados por la recirculación generada por la contrapresa.

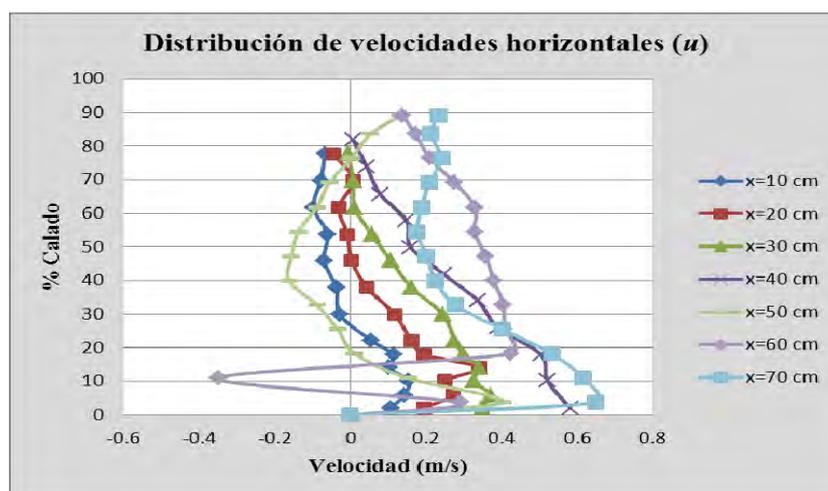


Figura VI.117: Distribución de velocidades medias horizontales dentro del colchón de agua para $Q=45.31$ l/s; $Y=33.5$ cm.

En la Figura VI.118 se grafica la tendencia de las velocidades medias verticales.

La distribución de velocidad vertical siguen una distribución análoga entre perfiles orientados a aumentar significativamente desde un inicio hasta el 60% del calado a consecuencia del avance del flujo en el cuenco de amortiguación, por el contrario al aproximarse a la lámina libre se produce una disminución en las velocidades verticales.

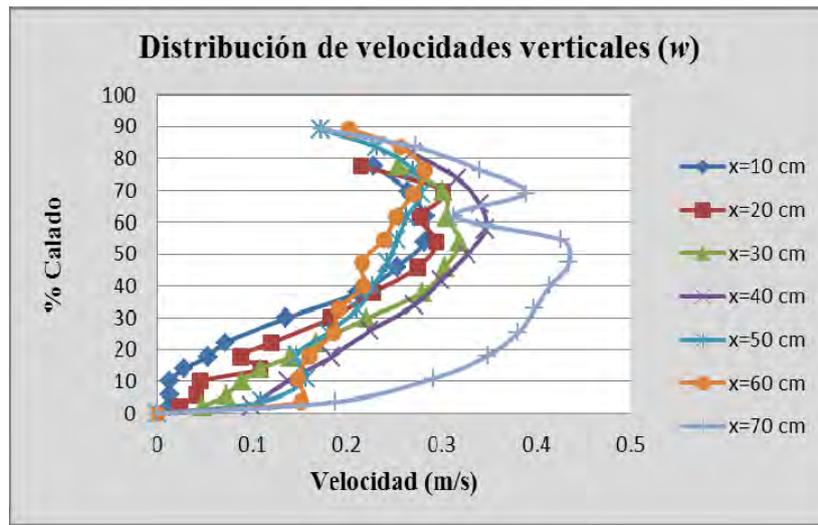


Figura VI.118: Distribución de velocidades medias verticales dentro del colchón de agua para $Q=45.31$ l/s; $Y=33.5$ cm.

En la Figura VI.119 se grafica la velocidad turbulenta horizontal para las distintas secciones de estudio.

En los perfiles limitados por x10 cm y x40 cm se nota el dominio del resalto sumergido al obtenerse valores elevados de velocidad turbulenta horizontal. Conforme el calado aumenta la velocidad disminuye al igual que en los perfiles mas alejados.

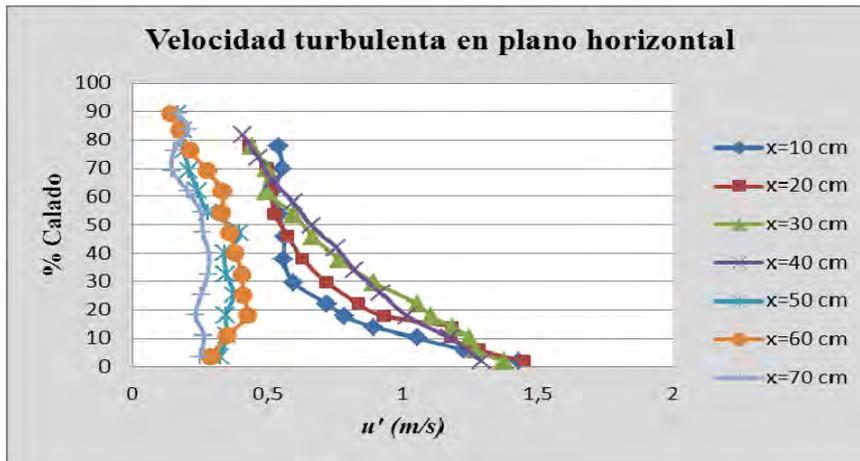


Figura VI.119: Velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=45.31$ l/s; $Y= 33.5$ cm.

En la Figura VI.120 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano transversal y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 33.5 cm.

Vemos como los perfiles de mayor y menor turbulencia se agrupan entre si adquiriendo un desarrollo uniforme en la relación de velocidades turbulentas v'/u' acotada por 0.5 y 1.

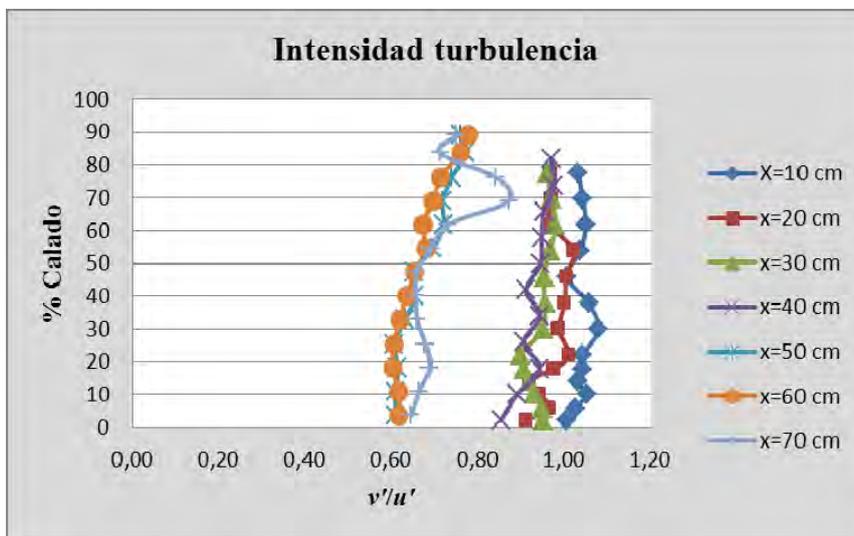


Figura VI.120: Relación de velocidad turbulenta transversal y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=45.31$ l/s; $Y= 33.5$ cm.

En la Figura VI.121 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano vertical y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 33.5 cm.

Los perfiles parten desde un 0.2 en cuanto a la relación de velocidades turbulentas w'/u' y progresivamente tienden a sufrir mayores variaciones acorde con el calado, sin embargo la relación alcanzada por v'/u' es superior frente a la relación w'/u' .

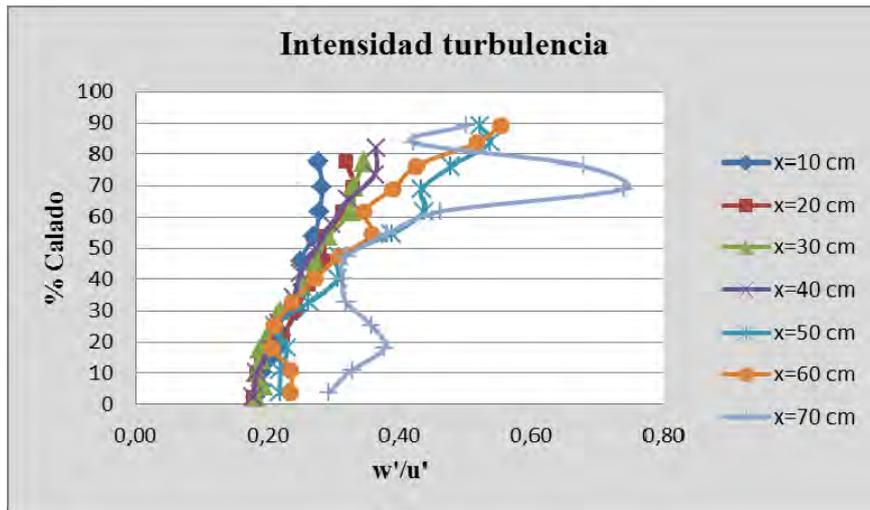


Figura VI.121: Relación de velocidad turbulenta vertical y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=45.31$ l/s; $Y= 33.5$ cm.

La Figura VI.122 muestra los valores de los perfiles de la energía cinética turbulenta referentes a las distintas secciones de estudio.

Podemos apreciar que en las primeras secciones de estudio se produce un gran movimiento turbulento implicando incrementos significativos en la energía cinética turbulenta en toda la columna de agua hasta la sección x40 cm. Para secciones posteriores se ve una disipación repentina de la energía cinética.

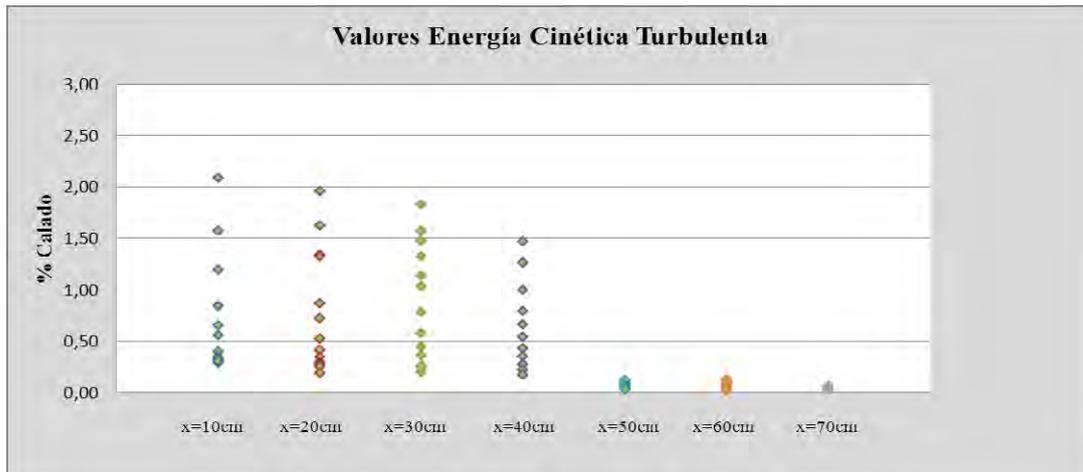


Figura VI.122: Desarrollo de la energía cinética turbulenta para $Q=45.31$ l/s; $Y=33.5$ cm.

La Fig. VI.123 muestra la evolución de la energía cinética turbulenta en los diferentes perfiles a lo largo del cuenco de amortiguación.

Encontramos un incremento de la energía cinética turbulenta para el perfil más cercano y asociado a la zona de mayor turbulencia. Ayudando así a que el fluido se mantenga agitado y que dicho transporte turbulento sea sustentado a lo largo del cuenco sobretodo en el fondo, para calados inferiores a un 20%. Lográndose una $TKE > 2$. También se aprecia que todas los perfiles son propensos a dispar la energía cinética en zonas próximas a la lámina libre así que los perfiles más alejados de la sección del chorro incidente tienden hacia valores de energía muy reducidos y uniformes. Por lo que el fluido se tranquiliza progresivamente.

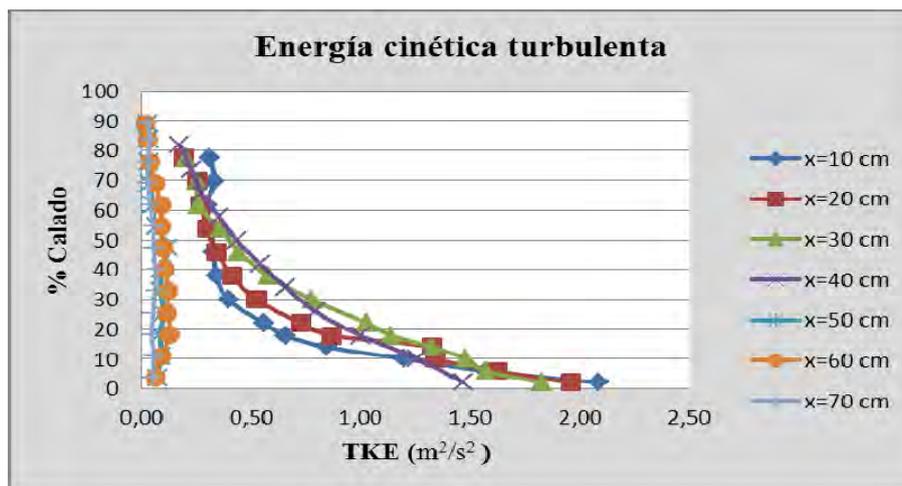


Figura VI.123: Perfiles de energía cinética turbulenta en el cuenco, para $Q=45.31$ l/s; $Y=33.5$ cm.

Colchón Y=43 cm.

En la Figura VI.124 se puede apreciar la distribución de velocidades horizontales y verticales en las diferentes secciones de estudio, logradas con un colchón de Y= 43 cm.

Al tener un mayor colchón de agua se puede ver en la distribución de velocidades el chorro de fondo domina en las secciones hasta un 20% del calado. A partir de ese punto se produce un cambio de fase ya que las velocidades horizontales comienzan a experimentar los efectos de las barreras al producirse velocidades negativas conforme se desarrollan hacia la superficie. Para las velocidades verticales situadas a 70 cm se aprecia que al estar más alejada de la zona de impacto, el perfil adquiere una evolución uniforme.

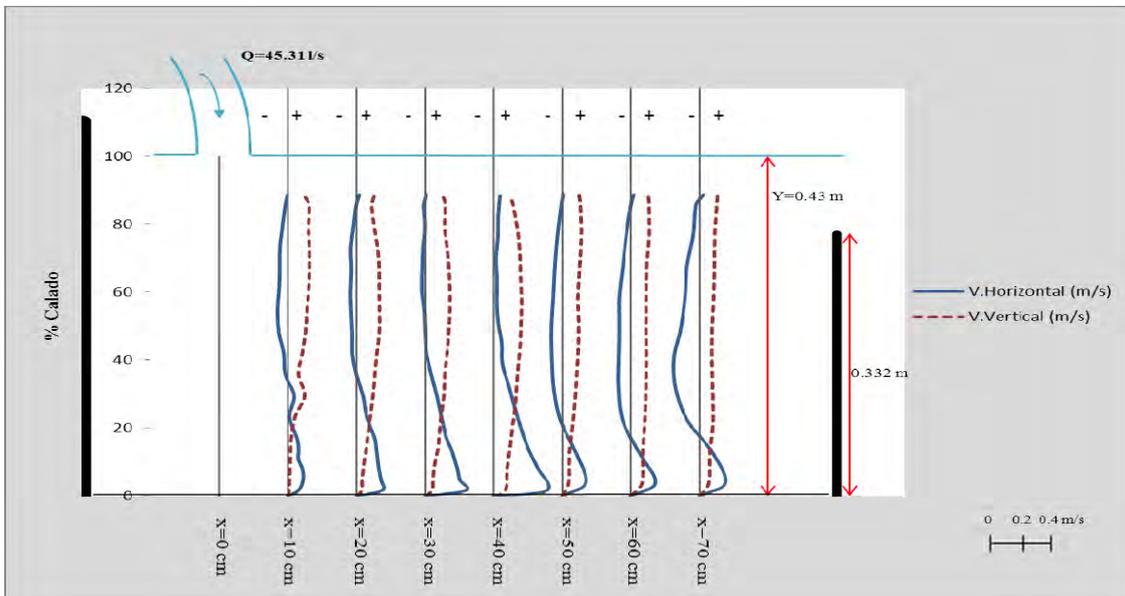


Figura VI.124: Perfiles de velocidad cada 10 cm desde el punto de impacto del chorro, para un caudal de 45.31 l/s e Y=43cm.

En la Figura VI.125 se grafica la tendencia de las velocidades medias horizontales.

En este caso vemos que el resalto hidráulico al tener mayor profundidad está mejor desarrollado, de manera que provoca aumentos de la velocidad horizontal para zonas cercanas al fondo, alcanzándose un máximo de 0.8 m/s. Se puede notar la influencia de la contrapresa sobre los perfiles de estudio ya que se experimenta un retroceso del fluido en las inmediaciones de la superficie.

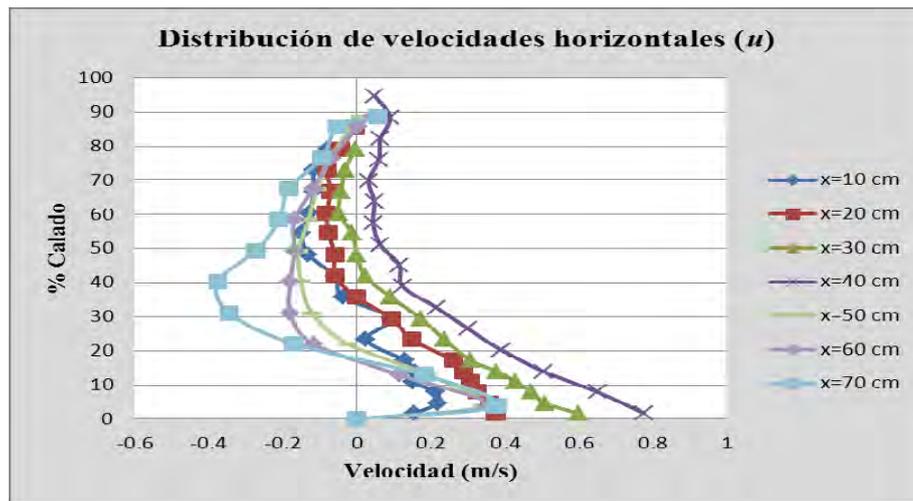


Figura VI.125: Distribución de velocidades medias horizontales dentro del colchón de agua para $Q=45.31$ l/s; $Y=43$ cm.

En la Figura VI.126 se grafica la tendencia de las velocidades medias verticales.

Al contrario que para las velocidades horizontales el máximo lo encontramos por encima del resalto sumergido, dado que la longitud del chorro es suficiente para producir el avance del fluido turbulento hacia la sección situada a 40 cm. Por lo que la distribución de velocidades sigue un desarrollo normal a lo largo del cuenco, sin embargo a partir de un 75 % del calado los perfiles adquieren valores de velocidad inferiores a 0.4 m/s.

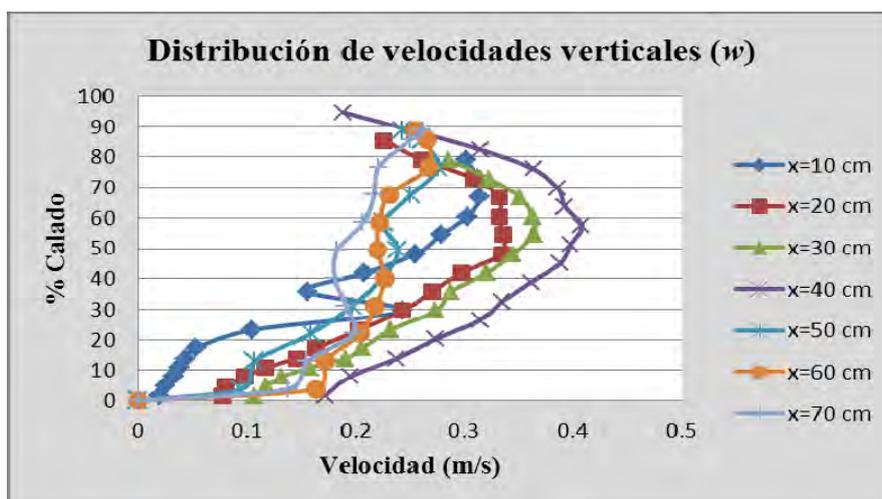


Figura VI.126: Distribución de velocidades medias dentro del colchón de agua para $Q=45.31$ l/s; $Y=43$ cm.

En la Figura VI.127 se grafica la velocidad turbulenta horizontal para las distintas secciones de estudio.

Al igual que para los colchones de agua antes analizados vemos como el desarrollo de la velocidad turbulenta en los perfiles próximos a la sección de mayor turbulencia alcanzan sus máximos para calados inferiores al 20 % sin embargo al dirigirse hacia la superficie se aprecia como la columna de agua en los perfiles registra una velocidad inferior a 1 m/s .

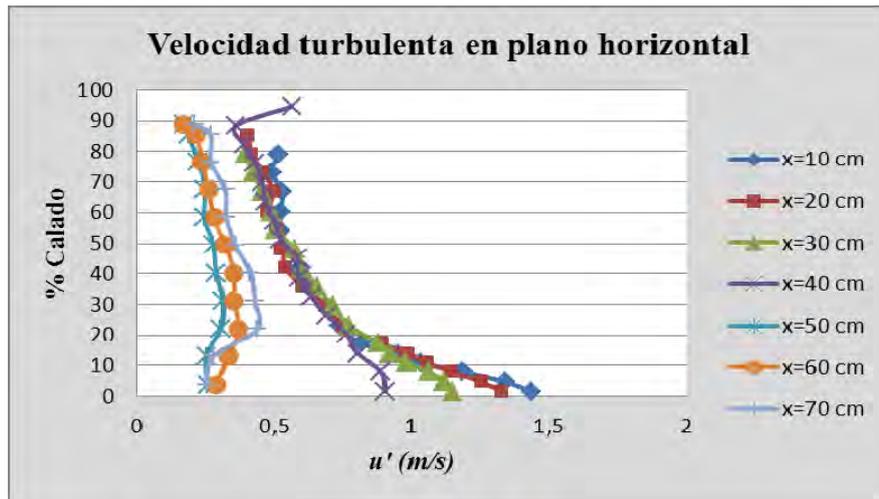


Figura VI.127: Velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=45.31$ l/s; $Y=43$ cm.

En la Figura VI.128 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano transversal y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 43 cm.

Como se ve los últimos perfiles siguen la tendencia de los primeros sin embargo se encuentran desfasados debido a que las fluctuaciones en la velocidad turbulenta horizontal son mayores en las secciones próximas a la zona de incidencia del chorro y horizontal es menor con respecto a los valores para las primeras secciones. De forma que la relación de velocidades turbulentas v'/u' adquieren valores lógicos entre 0.6 y 1.2.

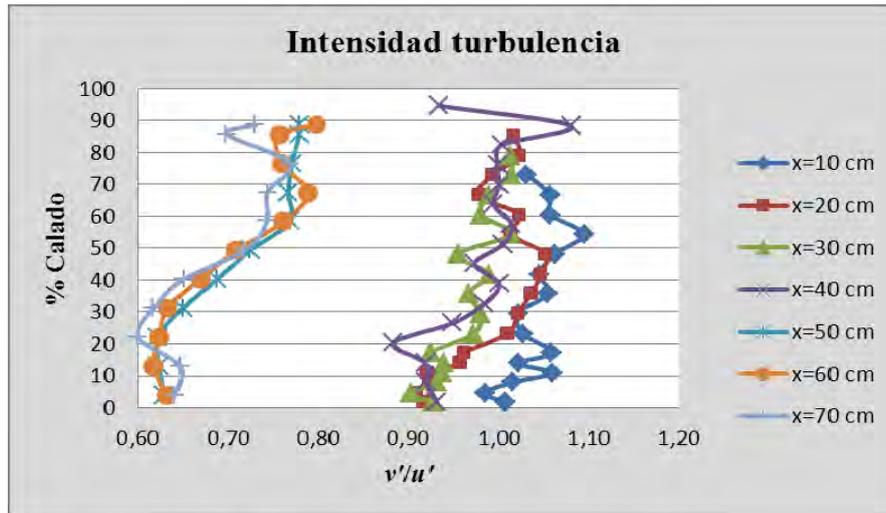


Figura VI.128: Relación de velocidad turbulenta transversal y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=45.31$ l/s; $Y= 43$ cm.

En la Figura VI.129 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano vertical y la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 43 cm.

Los perfiles tienden a incrementar sus valores en cuanto a la relación de velocidades turbulentas w'/u' desde el fondo a partir de 0.2 hacia la superficie. Registrándose en los últimos perfiles un máximo de 0.59 debido a la recirculación del fluido. Al contrario de lo que ocurre para la relación v'/u' .

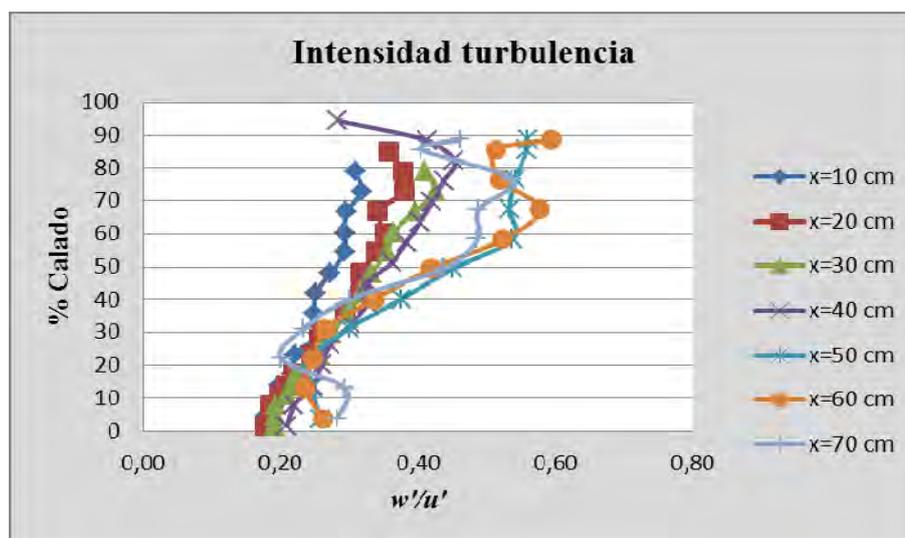


Figura VI.129: Relación de velocidad turbulenta vertical y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=45.31$ l/s; $Y=43$ cm.

La Figura VI.130 muestra los valores de los perfiles de la energía cinética turbulenta referentes a las distintas secciones de estudio.

Guiados por los valores de energía cinética turbulenta en las distintas secciones. Vemos que se capta una elevada energía cinética turbulenta en las dos primeras secciones. Posteriormente se produce una disipación progresiva desde el primer perfil hasta perfil situado a 40 cm para más adelante sufrir una pérdida bastante significativa en las secciones más alejadas del chorro incidente.

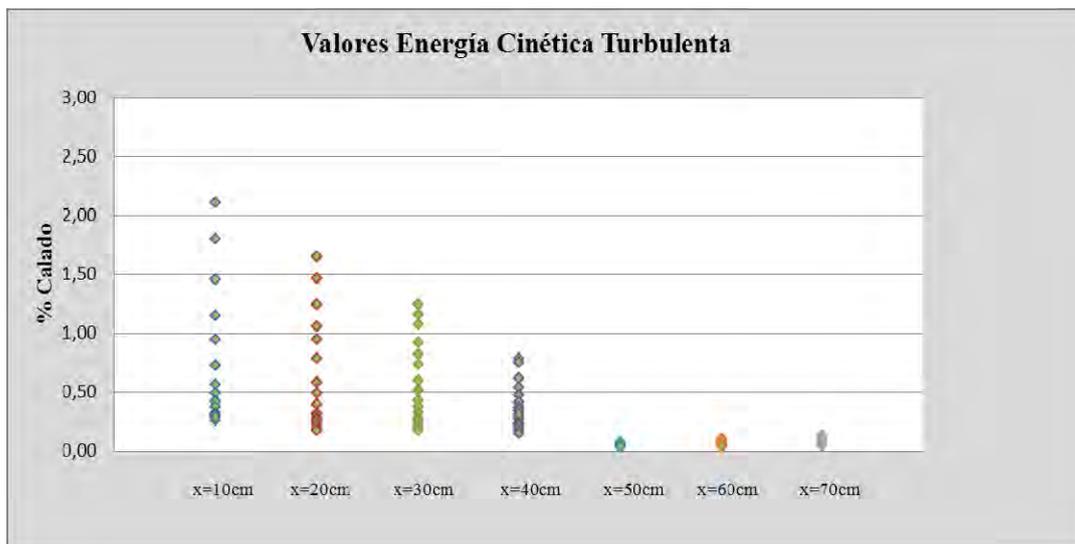


Figura VI.130: Desarrollo de la energía cinética turbulenta para Q=45.31 l/s; Y=43 cm.

La Figura VI.131 muestra la evolución de la energía cinética turbulenta en los diferentes perfiles a lo largo del cuenco de amortiguación.

El máximo valor de energía cinética se consigue sobre todo por el fondo del colchón de agua, no obstante para un calado superior al 20% se aprecia como los perfiles tienden hacia un valor comprendido entre $0.5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ disipando de esta manera dicha energía.

Por tanto los perfiles van perdiendo intensidad conforme se alejan de la sección situada a 10 cm de la zona de impacto del choro de agua.

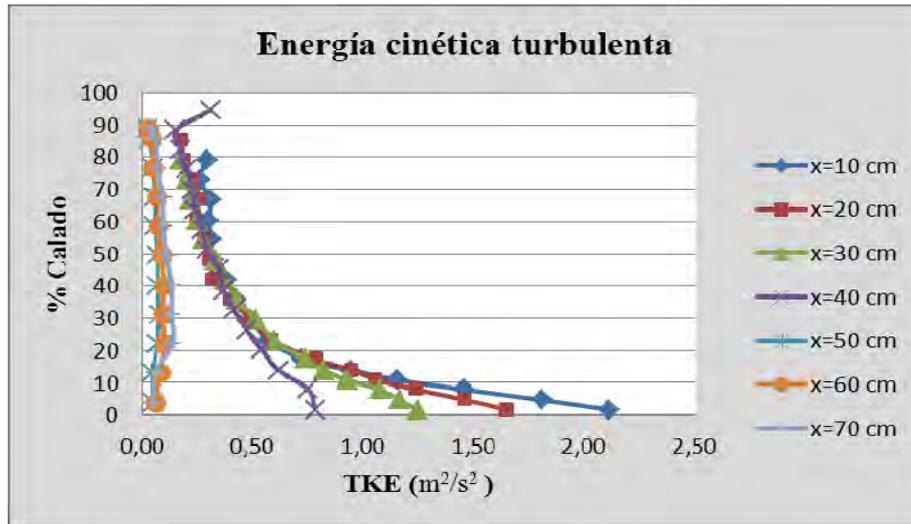


Figura VI.131: Perfiles de energía cinética turbulenta en el cuenco para $Q=45.31$ l/s; $Y=43$ cm.

Colchón $Y=52$ cm.

En la Figura VI.132, se puede apreciar la distribución de velocidades horizontales y verticales en las diferentes secciones de estudio, logradas con un colchón de $Y= 52$ cm.

En las cuatro primeras secciones de estudio se ve como al aproximarse a la superficie la velocidad horizontal adquiere valores casi nulos, mientras que el chorro de fondo está mejor definido dado el mayor colchón de estudio. Se crea una zona de transición al sufrir el efecto del resalto sumergido y la contrapresa, experimentado por la distribución de velocidad vertical y horizontal de las secciones situadas a 50, 60 y 70 cm de la zona de impacto.

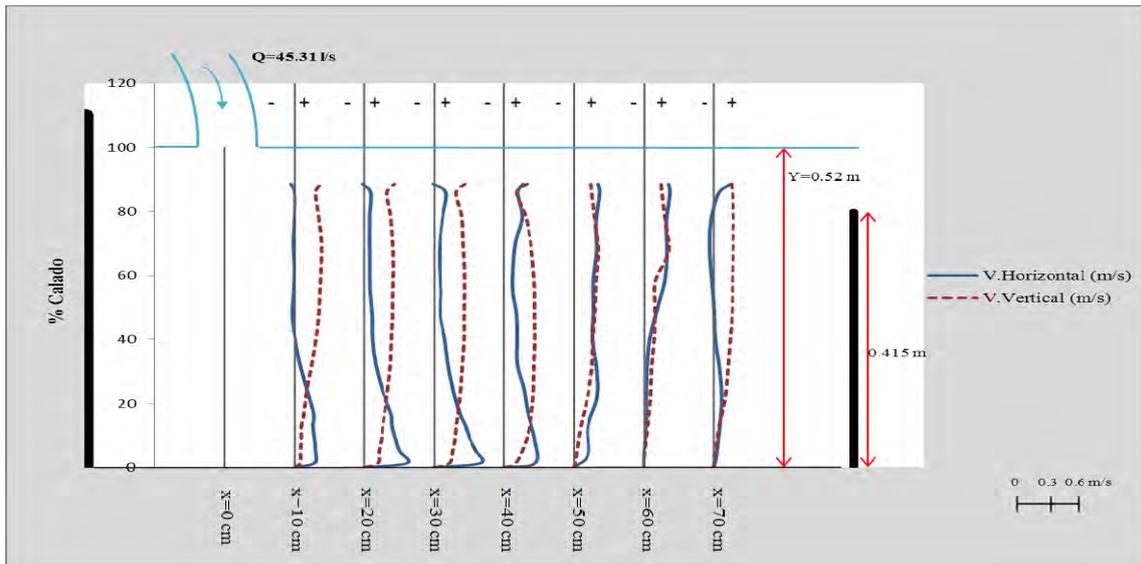


Figura VI.132: Perfiles de velocidad cada 10 cm desde el punto de impacto del chorro, para un caudal de 45.31 l/s e Y= 52cm.

En la Figura VI.133 se presenta la tendencia de las velocidades medias horizontales.

En la evolución que siguen los perfiles de velocidad horizontal se produce una zona de cambio de fase en la que las velocidades disminuyen por efecto del contraflujo creado por las barreras. De forma inversa se observa en los perfiles que los máximos en la velocidad horizontal se presentan en el fondo afectados por el rulo del resalto.

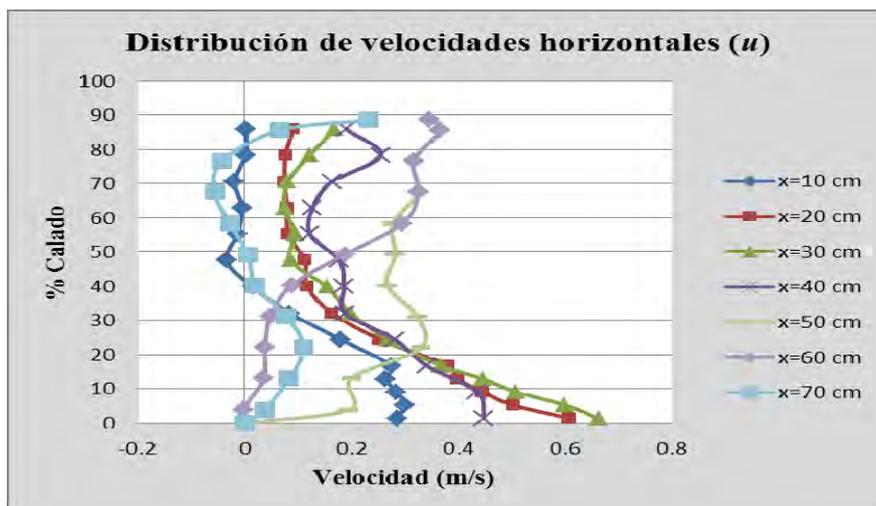


Figura VI.133: Distribución de velocidades medias horizontales dentro del colchón de agua para Q=45.31 l/s; Y=52 cm.

En la Figura VI.134 se presenta la tendencia de las velocidades medias verticales por separado.

Se produce una reducción de la velocidad a partir de un 70 % del calado y conforme se alejan del primer perfil. De igual forma y gracias al transporte del flujo turbulento se observa que los perfiles se orientan desde un origen de 0 y 0.2 m/s hacia velocidades superiores.

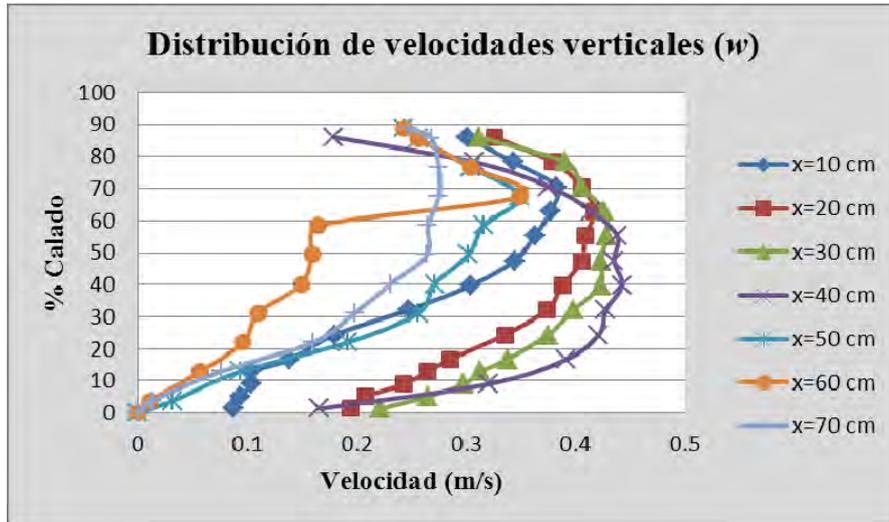


Figura VI.134: Distribución de velocidades medias verticales dentro del colchón de agua para $Q=45.31$ l/s; $Y=52$ cm.

En la Figura VI.135 se grafica la velocidad turbulenta horizontal para las distintas secciones de estudio.

Los perfiles se agrupan en dos zonas. La primera esta marcada por la tendencia desde el primer perfil hasta el cuarto, a incrementar desde el fondo hasta un 50 % del calado sin embargo por encima del resalto sumergido la velocidad turbulenta horizontal de los perfiles tiende a reducirse. Por otro lado los perfiles cercanos a la contrapresa toman velocidades turbulentas < 0.5 m/s.

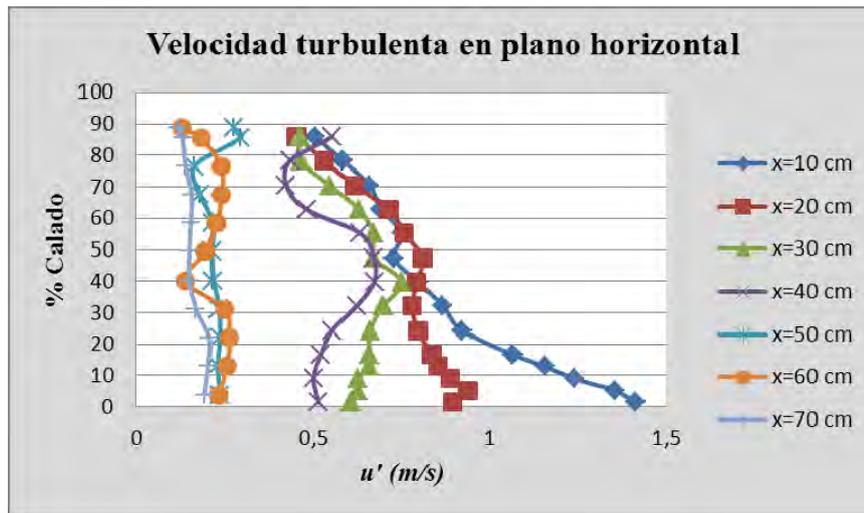


Figura VI.135: Velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=45.31$ l/s; $Y= 52$ cm.

En la Figura VI.136 se grafica la relación entre la velocidades turbulentas en el plano transversal con la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 52 cm.

Como se puede apreciar la relación de velocidades turbulenta v'/u' varía desde el fondo y en las proximidades de la lámina libre, adquiriendo valores entorno a un mínimo de partida 0.5 hacia un máximo de 1.40.

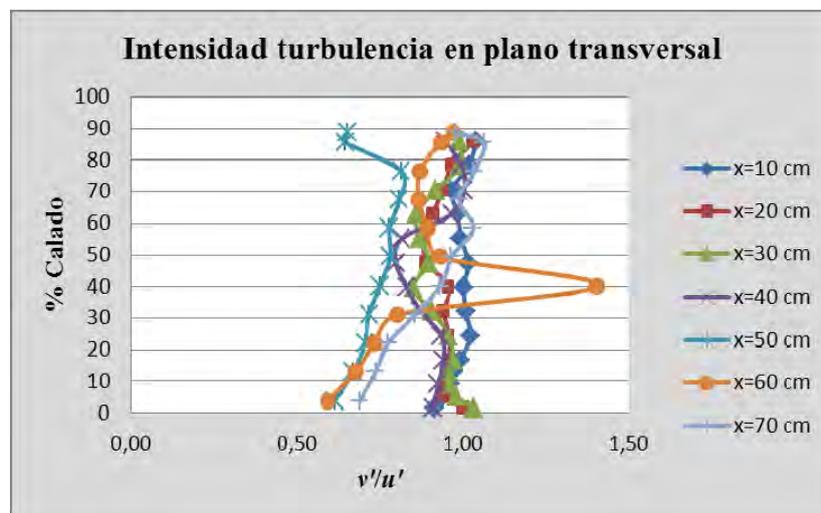


Figura VI.136: Relación entre la velocidad turbulenta transversal y velocidad horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=45.31$ l/s; $Y= 52$ cm.

En la Figura VI.137 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano vertical con la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 52 cm.

En los últimos perfiles es donde se registra un máximo en cuanto a w'/u' debido al despegue del fondo del flujo turbulento, también se aprecia que se encuentran desfasados respecto al grupo limitado por los perfiles x10 y x50 cm guiando su desarrollo hacia la superficie con valores de la relación w'/u' acotados por 0.2 y 0.6.

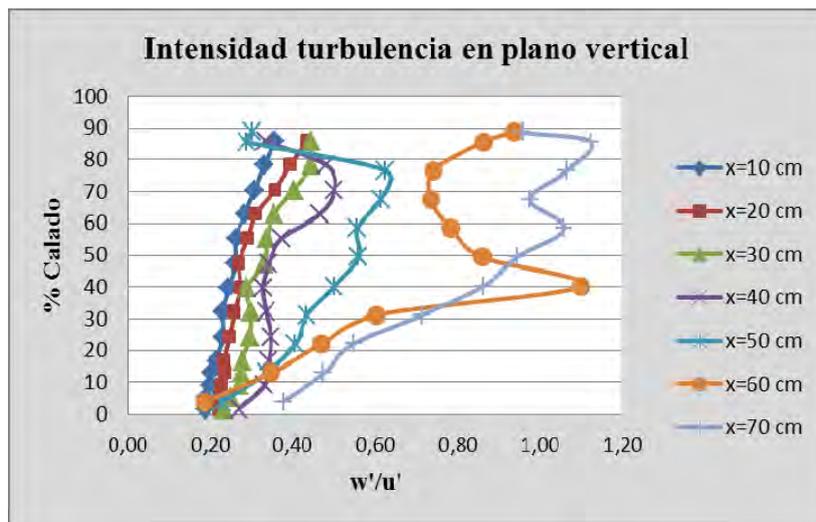


Figura VI.137: Relación entre velocidad turbulenta vertical y velocidad horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=45.31$ l/s; $Y= 52$ cm.

La Figura VI.138 muestra los valores de los perfiles de la energía cinética turbulenta referentes a las distintas secciones de estudio.

Se aprecia que en la primera sección se generan los valores más elevados de energía cinética turbulenta debido a que es proporcional al nivel de turbulencia. Inmediatamente desde la sección situada a 20 cm del impacto se produce la reducción de la energía, disipándose gradualmente una $TKE < 1.86$ m²/s² hacia los últimos perfiles.

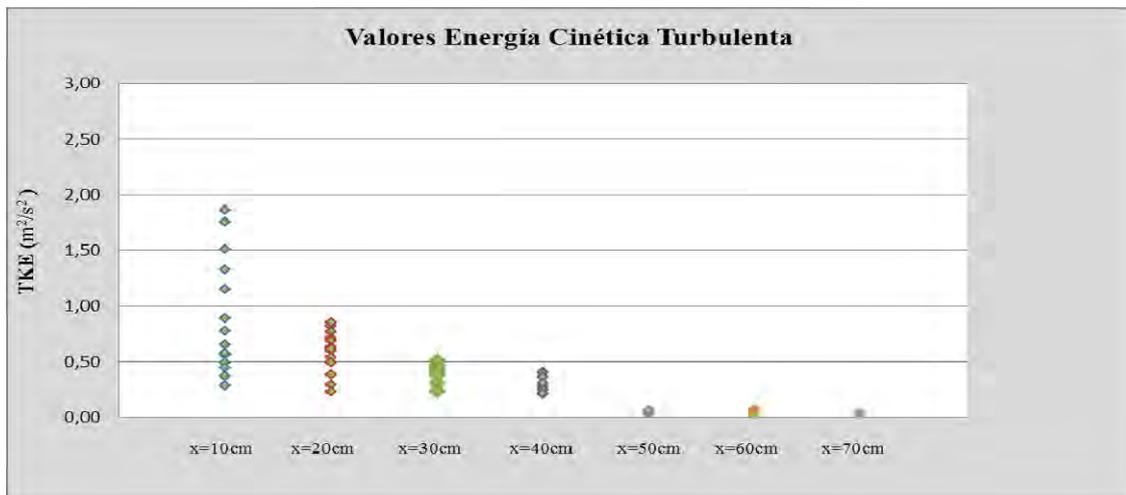


Figura VI.138: Desarrollo de la energía cinética turbulenta para $Q=45.31$ l/s; $Y=52$ cm.

La Fig. VI.139, muestra la evolución de la energía cinética turbulenta a lo largo del cuenco de amortiguación.

Para un calado inferior al 40% se observa que en la sección $x=10$ hay incrementos progresivos en cuanto a la energía cinética, alcanzándose un máximo con un valor de $1.86 \text{ m}^2/\text{s}^2$ gracias a que el fluido se encuentra lo suficientemente agitado en el fondo.

Los cuatro primeros perfiles por encima del chorro de fondo evolucionan hacia un valor reducido en cuanto a la energía cinética a causa de la recirculación generada por las barreras. Para los perfiles más alejados de la zona de mayor turbulencia se va notando en toda la columna de agua valores cercanos al 0.

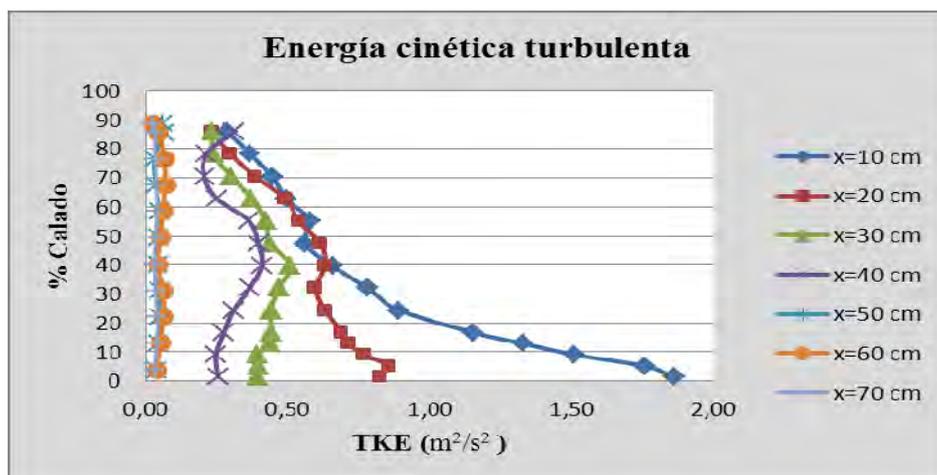


Figura VI.139: Perfiles de energía cinética turbulenta en el cuenco para un calado $Q=45.31$ l/s; $Y=52$ cm.

Colchón Y=64 cm.

En la Figura VI.140 se puede apreciar la distribución de velocidades horizontales y verticales en las diferentes secciones de estudio, logradas con un colchón de Y= 64 cm.

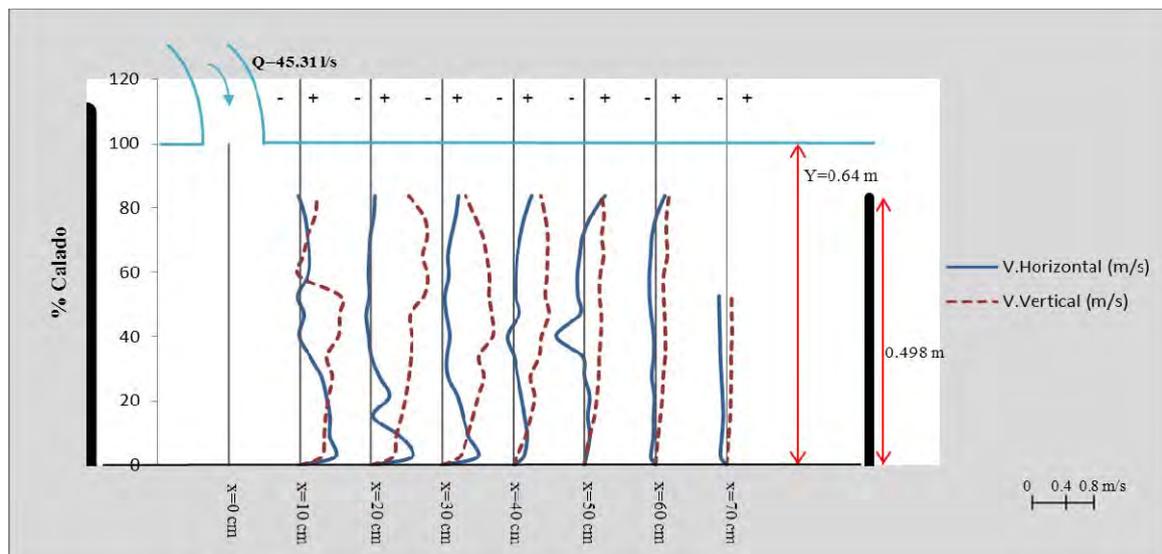


Figura VI.140: Perfiles de velocidad cada 10 cm desde el punto de impacto del chorro, para un caudal de 45.31 l/s e Y=64 cm.

La distribución de velocidades horizontales esta sujeta a una reducción de la velocidad conforme avanza hacia la superficie debido a la gran influencia que ejerce la contrapresa. Ocurre al contrario por debajo de un 20% del calado al quedar definido el chorro de fondo hasta la sección 40 cm. Las dos últimas secciones adquieren una distribución continua de velocidades. En cuanto a la distribución de velocidad en general tiende a incrementar hacia la superficie.

En la Figura VI.141 se presenta la tendencia de las velocidades medias horizontales por separado.

Se observa que el máximo de velocidad horizontal se produce cercano a la solera. De igual forma los efectos del resalto continúan hasta la sección x40 cm por lo que los perfiles conforme evolucionan van tomando valores reducidos. Finalmente por encima de un 70 % del calado se nota un cierto aumento en la velocidad.

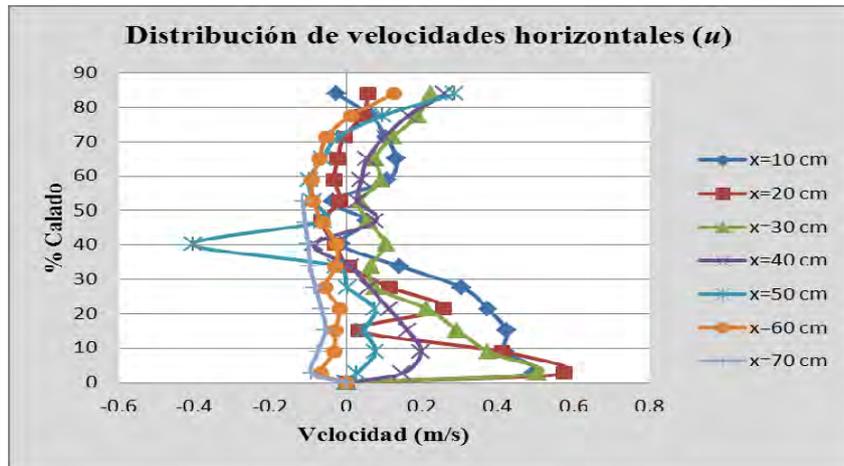


Figura VI.141: Distribución de velocidades medias horizontales dentro del colchón de agua para $Q=45.31$ l/s; $Y=64$ cm.

En la Figura VI.142 se presenta la tendencia de las velocidades medias verticales por separado.

El flujo vertical aumenta hacia la superficie para los perfiles cercanos a la zona de incidencia del chorro. En perfiles posteriores la velocidad disminuye en toda la columna de agua con velocidades inferiores a 0.4 m/s. Al contrario de la velocidad horizontal tienden a disminuir su velocidad cercanos a la lámina libre.

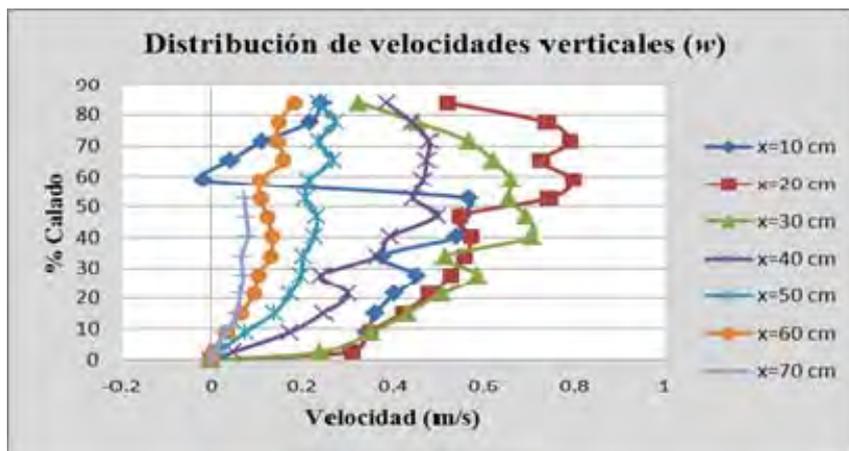


Figura VI.142: Distribución de velocidades medias verticales dentro del colchón de agua para $Q=45.31$ l/s; $Y=64$ cm.

En la Figura VI.143 se grafica la velocidad turbulenta horizontal en las diferentes secciones de estudio.

Aquí podemos observar claramente una fluctuación de la velocidad turbulenta horizontal en todos los perfiles de estudio que se orienta entre 0.1 y 0.3 m/s. Lográndose un máximo de 0.32 m/s perteneciente al perfil x10 cm ya que en ese punto la desviación estándar es elevada con respecto a la media.

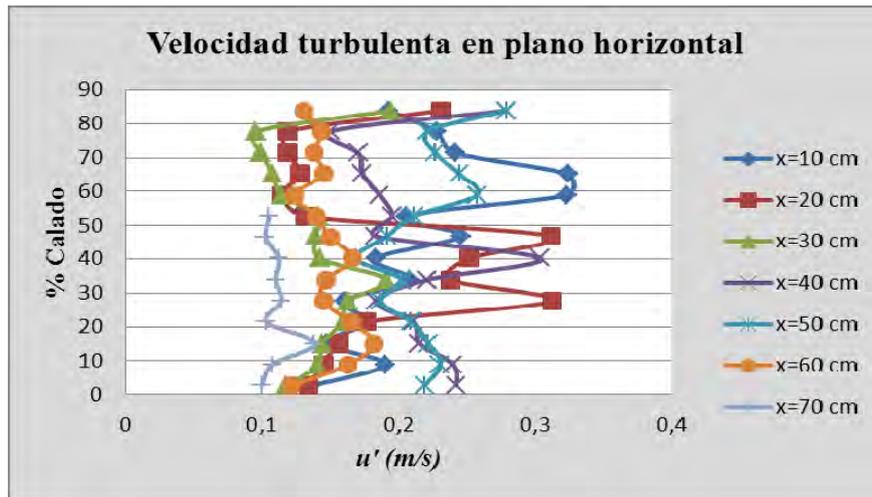


Figura VI.143: Velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=45.31$ l/s; $Y= 64$ cm.

En la Figura VI.144 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano transversal con la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 64 cm.

Se aprecia que a consecuencia de que el movimiento turbulento se desprende del fondo, la relación de velocidades turbulentas v'/u' experimenta mayores cambios hacia la superficie lográndose un máximo de 1.5.

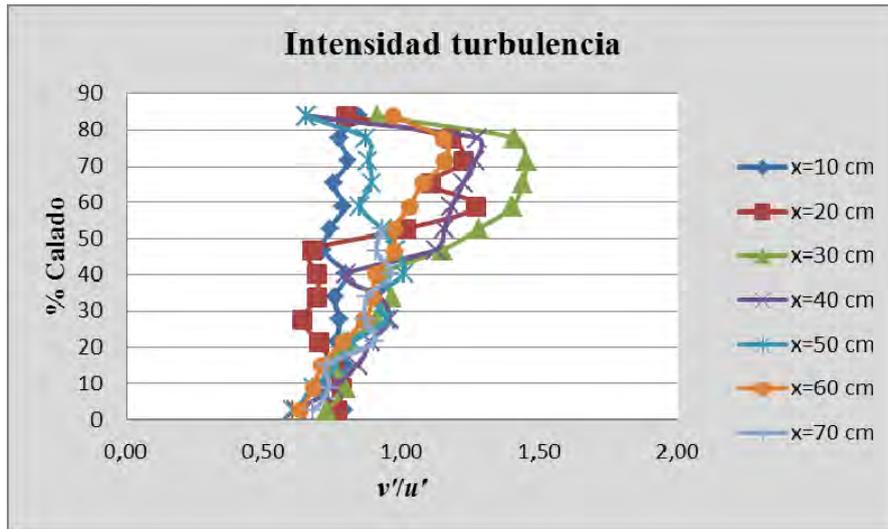


Figura VI.144: Relación entre velocidad turbulenta transversal y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=45.31$ l/s; $Y= 64$ cm.

En la Figura VI.145 se grafica la relación entre las velocidades turbulentas en el plano vertical con la velocidad turbulenta en plano horizontal, considerando un colchón de agua de 64 cm.

Los perfiles siguen una distribución muy similar provocando que los valores de la relación w'/u' estén entre un 0.5 hasta un máximo de 2.

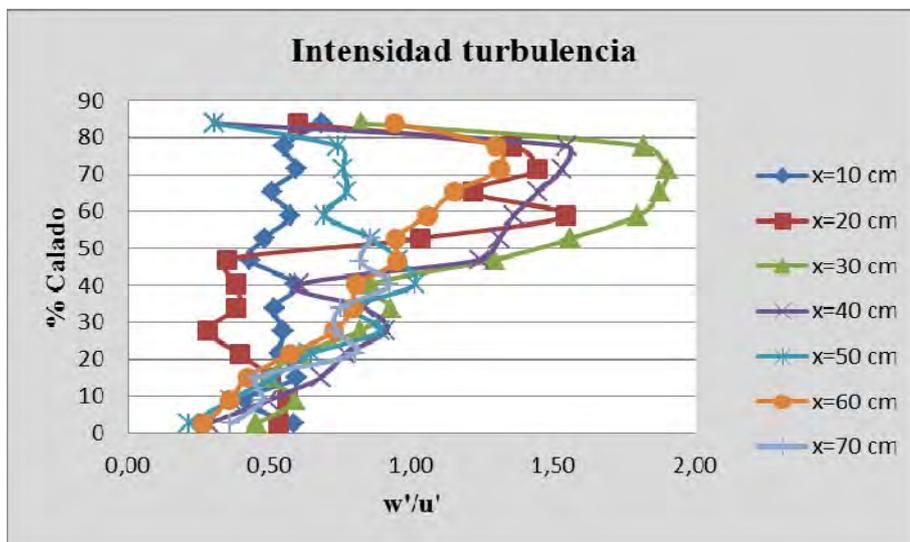


Figura VI.145: Relación entre velocidad turbulenta vertical y velocidad turbulenta horizontal en diferentes secciones de estudio con $Q=45.31$ l/s; $Y= 64$ cm.

La Figura VI.146 muestra los valores de la energía cinética turbulenta, referentes a las distintas secciones de estudio.

Los valores de energía cinética turbulenta conseguidos son bajos con respecto a los anteriores colchones de agua analizados en todas las secciones de estudio a lo largo del cuenco.

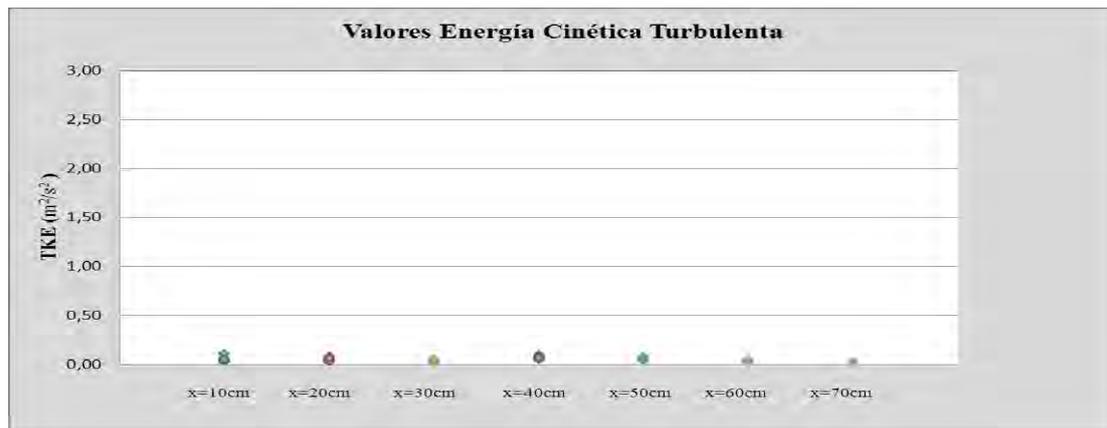


Figura VI.146: Desarrollo de la energía cinética turbulenta para $Q=45.31$ l/s; $Y=64$ cm.

La Figura VI.147 muestra la evolución de la energía cinética turbulenta en los diferentes perfiles a lo largo del cuenco de amortiguación.

Se presenta una mayor evolución de la energía cinética asociada a la fuerza del chorro de fondo generado por el resalto sumergido que presentan los primeros perfiles alcanzándose un máximo 0.10 m^2/s^2 . Cada vez que el fluido se desplaza hacia aguas abajo se aprecia como los perfiles van perdiendo energía, viéndose más afectados los perfiles cercanos a la contrapresa al desarrollar valores de $TKE < 0.040$ m^2/s^2 .

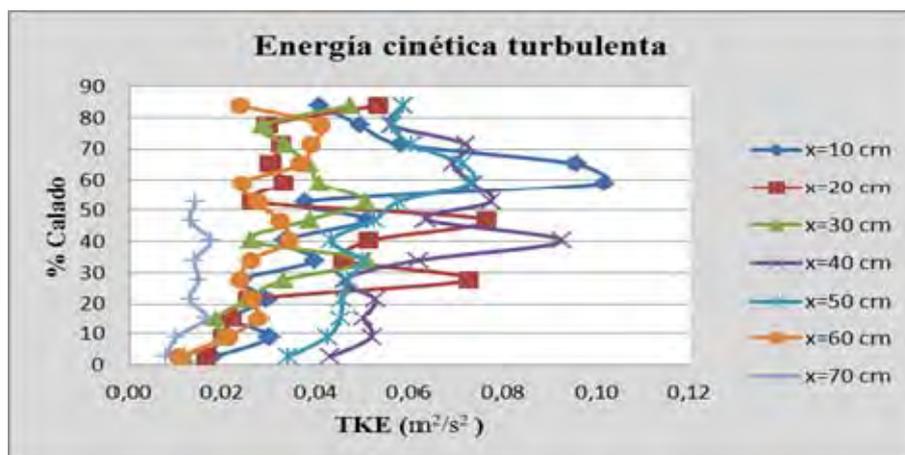


Figura VI.147: Perfiles de energía cinética turbulenta en el cuenco, para $Q=45.31$ l/s; $Y=64$ cm.

VII. CONCLUSIONES

- ✓ El modelo físico utilizado, fue de gran ayuda para llevar a cabo la estimación y el comportamiento que siguen la distribución de velocidades, así como los procesos de intensidad turbulenta y energía cinética turbulenta asociada, los cuales tiene lugar dentro del cuenco de amortiguación de un aliviadero de vertido libre.
- ✓ El equipo laser, sonda ADV representa una solución a la hora de analizar flujos bifásicos como es nuestro caso, acotando las mediciones en tres direcciones(x, y, z), de manera que el estudio resulta viable y objetivo.
- ✓ El filtro utilizado es importante en cuanto al tratamiento de datos, derivados de los tres caudales de estudio y sus distintos colchones de agua, por lo que correspondientemente se dedujo el método de filtro con mejor rendimiento, resultando ser el de umbral velocidad(K), con el cual se obtienen series de datos menos desvirtuadas. Lo que nos lleva a deducir un criterio basado en la elección de un parámetro $k=2$ para series cuya desviación sea superior a 70 y $k=2.5$ por el contrario para series con una desviación inferior.
- ✓ La energía cinética turbulenta se ve afectada, por el caudal trasegado al adquirir mayor fuerza en zonas cercanas a la solera para colchones formados por cuatro barreras, alcanzándose incrementos de dicha energía en torno a un 5 y 20% del calado.
- ✓ Al tener caudales de 30.67 y 19.58 l/s, se nota el influjo de la contrapresa, para colchones formados por cinco y seis barreras al causar un efecto rebote con el flujo provocado por el chorro, el cual imprime una mayor fuerza turbulenta dando lugar a incrementos en la energía cinética que se alcanzan para calados superiores al 60%, este proceso se encuentra siempre asociado a la primera sección.
- ✓ La pérdida y disipación de dicha energía cinética turbulenta sigue una evolución parecida para cada uno de los caudales analizados al producirse desde las primeras secciones hasta las últimas, una transferencia de la energía almacenada en el fluido. De esta forma a lo largo del cuenco de disipación el comportamiento del fluido es el adecuado.
- ✓ Siempre se tiende a buscar un balance energético del fluido que es proporcional al nivel de turbulencia, relacionado a su vez con el nivel de aireación introducido, lo que impulsa a que se noten incrementos en la energía cinética turbulenta.
- ✓ Existen casos en que para los caudales mayores y relacionado a las secciones de estudio más cercanas al impacto del chorro, la energía cinética turbulenta es casi nula, puede ser debido al gran número de burbujas que la sonda no detecta.

- ✓ Independientemente del caudal, los máximos de intensidad turbulenta están relacionados con los puntos donde generalmente la desviación estándar (velocidad turbulenta) es elevada con respecto a la velocidad media.
- ✓ La distribución que siguen los perfiles con respecto a la intensidad de turbulencia tienen una marcada preferencia en las primeras secciones debido a la gran fluctuación de velocidades producidas por la influencia del resalto hidráulico y situándose en dicha zona los puntos máximos de intensidad turbulenta.
- ✓ De forma general la intensidad turbulenta horizontal es mayor con respecto a la vertical y la transversal, para el caudal medio y alto. No siendo el mismo resultado para el caso del caudal bajo en el que la intensidad turbulenta transversal es la superior.
- ✓ La relación existente entre las velocidades turbulentas v'/u' es relativamente superior respecto a w'/u' ver tablas anexo I.
- ✓ Las velocidades horizontales se ven mayormente afectadas por el resalto hidráulico sumergido en comparación con las velocidades verticales, notándose en términos generales sus consecuencias hacia el fondo de la solera y para las primeras secciones, de manera que se consigue una caracterización correcta del chorro de fondo.
- ✓ Conforme se avanza a lo largo del cuenco y con un mayor número de barreras, se advierte que las velocidades verticales y horizontales tienden a igualarse (balance del fluido). A consecuencia de que los máximos de velocidad horizontal se asocian a calados en torno al 10 y 35% ,en comparación con las velocidades verticales en la que los extremos se obtienen para calados superiores.
- ✓ Según la tendencia para la distribución de velocidades, según los resultados obtenidos de los tres caudales analizados la velocidad horizontal resulta ser la predominante respecto a la velocidad vertical.
- ✓ En el cuerpo del resalto da lugar acciones de turbulencia, tanto en la parte superior como en el fondo (efecto del contorno), por lo que las distribuciones de los perfiles de velocidad presentan zonas de retroceso y avance.
- ✓ Para todos los caudales analizados, acorde con el nivel de calado conseguido en el cuenco gracias a las barreras. Se nota que el resalto hidráulico sumergido se desarrolla perfectamente adquiriendo suficiente longitud para dar lugar al chorro de fondo. Si la longitud del resalto es insuficiente, entonces se crea una distribución continua de velocidades.

ANEXO II

**COLECCIÓN
FOTOGRAFICA.**



Figura 1: Vista frontal del aliviadero de vertido libre.



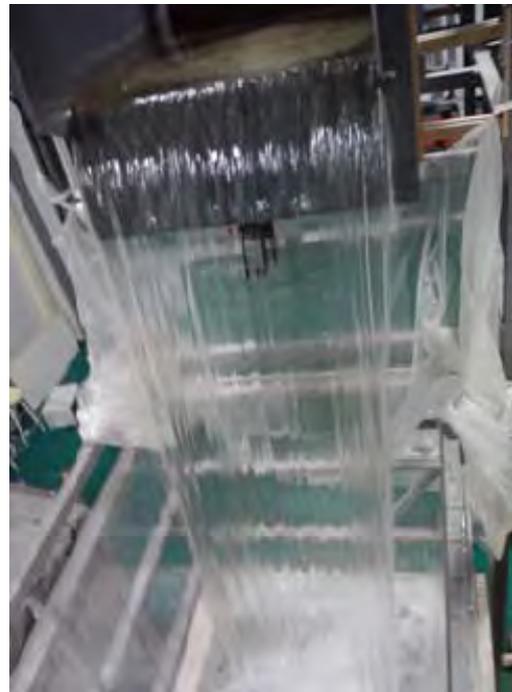
Figura 2: Vista de perfil del modelo físico utilizado.



Figura 3: Detalle aguas arriba del aliviadero provisto de un tranquilizador de fluido.



Figura 4: Desarrollo del chorro al existir poca profundidad en el cuenco.



F

Figura 5: Impacto del chorro dentro del cuenco.



Figura 6: Recolección de datos para un colchón de 12.5 cm, generado por una barrera.



Figura 7: Evolución del resalto hidráulico para un caudal de 30.67l/s.

BIBLIOGRAFIA

Bélanguer, J.B. (1838). Résumé de leçons, Mémoire, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. París.

Blanckaert, K., Lemmin, U. (2006). Means of noise reduction in acoustic turbulence measurements. Journal of Hydraulic Research Vol. 44, No. 1, pp. 3-17.

Carrillo, JM. (2004). “Determinación experimental de distribuciones de velocidades e índices turbulentos de algunos tipos de resaltos hidráulicos”. Proyecto de Fin de Carrera. Ingeniería Técnica de Obras Públicas-Especialidad Hidrología. UPCT.

Castillo, E, L.G. Estructura Disipadoras de energía por resalto. Facultad de Ingeniería-Universidad Central del Ecuador.

Castillo, E, L.G, Disipadores de energía; Universitat Politècnica de Catalunya Barcelona. J

Castillo, L (1989). Metodología experimental y numérica para la caracterización del campo de presiones en los disipadores de energía hidráulica. Aplicación al vertido libre en presas bóveda. Tesis doctoral. Escuela Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña, UPC.

Castillo, E, L.G. (2002). “Apuntes de Obras y Aprovechamientos Hidráulicos”. Universidad Politécnica de Cartagena.

Castillo, E, L.G. (2007). “Characterization of undeveloped and developed jets in shallow and deep pool. Congress of IAHR, The Association of Hydraulic Engineering & Research Venice, Italy. 1-6 July 2007.

Castillo, L. (2008). “Validation of instantaneous velocities measurements with ADV equipment in turbulent high two-phase flows”. The Eight Int. Conf. on Hydro-Science and Engineering (ICHE 2008). Nagoya, Japan, Sep. 2-8.

Castillo, L. (2009a). Measurement of velocities and characterization of some parameters of free and submerged hydraulic jumps. 33rd International Association of Hydraulic Engineering & Research Congress, IAHR. Vancouver, Canada, August 10-14.

Castillo, E, L.G. (2009b). Filtrado de velocidades y caracterización de parámetros dentro de resaltos hidráulicos libres y sumergidos Jornadas de Ingeniería del Agua, España, Madrid 27 y 28 de octubre de 2009 (CEDEX).

García, S. (2008). “Caracterización de resaltos hidráulicos libres a partir de velocidades instantáneas con equipo Doppler. Flujo aguas abajo de un aliviadero. Proyecto Fin de Carrera. Ingeniería Técnica de Obras Públicas-Especialidad Hidrología.

Goring, G., Nikora, V. (2002). Despiking acoustic Doppler velocimeter data. Proc. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 128, N° 1, January 1. pp. 117-126.

Inglés, E. (2009). “Caracterización paramétrica de resaltos hidráulicos libres y sumergidos a partir de medidas de velocidades instantáneas con equipo Doppler. Proyecto Fin de Carrera. Ingeniería Técnica de Obras Públicas-Especialidad Hidrología. UPCT.

Molina Miñano, B (2010). Caracterización de resaltos hidráulicos a través de medidas de velocidades instantáneas con equipo Doppler. Análisis, validación y métodos de filtrado de datos. Proyecto de Fin de Carrera. Ingeniería Técnica de Obras Públicas-Especialidad Hidrología. Universidad Politécnica de Cartagena, UPCT.

Moore W. L (1943) Energy loss at the base of a free overfall. Transactions, American Society of Civil Engineers, vol 108, pp. 1343-1360.

Nortek (2003). User Guide. Technical Documentation.

Ohtsu, F., Yasuda, Y., Awazu, S. (1990). Free and submerged hydraulic jumps in rectangular channels. Research Inst. of Science and Technology, Nihon University, No 35.

Rajaratnam, N. (1965). The hydraulic jump as wall jet. Proc. ASCE, Journal of Hydraulic Division., 91(HY5),pp. 107-132.

Stilling basin length optimization for hvammur hydro electric project. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Iceland, Iceland, Hjardarhagi 6, 107 Reykjavik.

Sontek ADV Field (2001). Acoustic Doppler Velocimeter. Technical Documentation.

Ven Te Chow (1998). Hidráulica de canales abiertos. Ed. McGraw-Hill.

Vera. C. (2011). Determinación experimental de distribución de velocidad e índices turbulentos en el cuenco de amortiguación de un aliviadero de vertido libre por coronación. Proyecto de Fin de Carrera. Ingeniería Técnica de Obras Públicas-Especialidad Hidrología. Universidad Politécnica de Cartagena, UPCT.

Información web:

<http://www.ugr.es>

<http://www2.mech.kth.se>