

Trabajo Fin de Máster

"EL EMPLEO DE SONDAS DE ULTRASONIDOS PARA LA OBTENCIÓN DE PERFILES DE VELOCIDADES Y DESCARGAS EN CANALES ABIERTOS"

Intensificación: *HIDRÁULICA URBANA*

Autor:

JAVIER MECA GARCÍA

Director:

DR. JAVIER SORIANO OLIVARES

SEPTIEMBRE, 2016



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma



Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto

Título del TFM en español: *"EL EMPLEO DE SONDAS DE ULTRASONIDOS PARA LA OBTENCIÓN DE PERFILES DE VELOCIDADES Y DESCARGAS EN CANALES ABIERTOS"*

Título del TFM en inglés: *"THE USE OF ULTRASONIC PROBES OBTAINING VELOCITY AND DISCHARGE PROFILE IN OPEN CHANNELS"*

Título del TFM en Valenciano: *"L'ÚS DE SONDAS D'ULTRASONOS PER A L'OBTENCIÓ DE PERFILS DE VELOCITATS I DESCÀRREGUES EN CANALS OBERTS"*

Alumno: JAVIER MECA GARCÍA

Director: DR. JAVIER SORIANO OLIVARES

Fecha de Lectura: SEPTIEMBRE, 2016

Resumen

El presente trabajo trata de estudiar el comportamiento de varios sensores comerciales de ultrasonidos utilizados para la medición de caudales tanto en sistemas de agua a presión como sistemas en lámina libre. La utilización de sistemas de medición por ultrasonidos presenta numerosas ventajas de cara a la obtención de perfiles de velocidad y caudales tanto en instalaciones a presión como en lámina libre. Se trata de sistemas no intrusivos, que no producen pérdidas de carga ni disponen de partes móviles, por lo que vida útil es elevada, con un mantenimiento simple y económico. Su rango de medición es muy amplio y su principio de funcionamiento es independiente de las propiedades físicas del fluido, si éste es homogéneo.

La finalidad de este proyecto es dual, por un lado recopilar datos que permitan conocer de una manera más extensa el comportamiento de estos dispositivos, y por otro, determinar la fiabilidad de las sondas de ultrasonidos como método de obtención de caudales y velocidades. Para lograr estos objetivos, se ha desarrollado una primera parte experimental, que ha consistido en la medición de caudales en un canal de gran capacidad en Viena, y una segunda fase de análisis de los resultados y estudio de las capacidades de cada equipo y las propias de la instalación.

La fase experimental se ha desarrollado en las instalaciones de investigación de la Universidad de Recursos Naturales y Ciencias de la Vida (BOKU) de Viena, durante el año 2014. Concretamente se ha medido en un canal de 120 metros de longitud, de sección rectangular de 5 metros de ancho y con capacidad máxima de hasta 10 m³/s, que conecta el curso principal del río Danubio con el Canal del Danubio, que atraviesa el centro de la ciudad de Viena. El canal dispone de tres compuertas a lo largo de éste, cuya función es la de controlar los niveles de descarga y de calado. Mediante la combinación de diferentes caudales y calados es posible trabajar en un amplio rango operacional con varias características del flujo. Es importante conocer la distribución del campo de flujo en la sección transversal de entrada y de salida de la sección de medición en todo el rango de funcionamiento.

Las tres sondas de ultrasonidos analizadas son las que se describen a continuación:

a) NivuFlow750: transmisor fijo para la medición de caudales continuos, control de caudales y almacenamiento de valores de medición recopilados. Está diseñado para el empleo en canales abiertos, cerrados y tuberías con diversas formas y dimensiones. Su modelo numérico de descarga integrado permite una determinación del caudal de manera más precisa, estable y fiable bajo condiciones de medición difíciles.

b) OTT SLD: dispositivo estático para la medición continua de la velocidad y el nivel del flujo. Su principio de funcionamiento se basa en el efecto acústico Doppler, proporcionando unos resultados fiables incluso en caso de inundación o con una gran carga de flotantes. Con un mantenimiento rápido y económico, el sistema necesita únicamente una fijación en una orilla. Equipado con dos convertidores ultrasónicos horizontales, un procesador de señales inteligente analiza los valores de medición obtenidos a través de éstos, proporcionando un registrado de datos o un caudal calculado, permitiendo al SLD (Side Looking Doppler) convertirse en un sistema de medición flexible y continuo con múltiples posibilidades de uso.

c) FlowTracker: caudalímetro de efecto Doppler de punto único diseñado para la medición de campos de velocidades. La tecnología se basa en el principio de ADV (Acoustic Doppler Velocimeter), permitiendo ventajas varias como una medición de la velocidad precisa en un volumen de muestra remoto, mediciones en dos o tres dimensiones o tiempos de respuesta rápidos. Su aplicabilidad se extiende a ríos, canales abiertos, tuberías alargadas o a instalaciones de tratamientos de aguas.

Con todo ello, los objetivos particulares de este trabajo son:

1. Estudio y dominio en el manejo tanto del software como del hardware de cada uno de los dispositivos a emplear.
2. Obtención del rango operacional del Canal de Investigación en función de la posición de las compuertas de entrada y salida de éste.
3. Medición del campo de velocidad media en las secciones de entrada y salida del tramo descubierto para los puntos de operaciones seleccionados.
 - a. Implementación del método velocidad-área
 - b. Análisis y representación gráfica de las mediciones realizadas
4. Presentación del campo de velocidades medida en función del tiempo y analizar las turbulencias características para los puntos de operación seleccionados.
5. Investigación de los efectos del trazado, con especial detalle a la curva anterior a la entrada al tramo descubierto, con y sin ningún tipo de instalaciones (como cañas u otros correctores del flujo).
6. Evaluación del sistema de medición de descarga NivuFlow750 instalado permanentemente. Formulación de un posible método de calibración a partir de los datos obtenidos mediante los distintos sistemas de medición.

Resum

El present treball tracta d'estudiar el comportament de diversos sensors comercials d'ultrasons utilitzats per a mesurar caudals tant en sistemes d'aigua a pressió com a sistemes en làmina lliure. La utilització de sistemes de mesura per ultrasons presenta nombrosos avantatges de cara a l'obtenció de perfils de velocitat i cabals tant en instal·lacions a pressió com en làmina lliure. Es tracta de sistemes no intrusius, que no produeixen pèrdues de càrrega ni disposen de parts mòbils, pel que vida útil és elevada, amb un manteniment simple i econòmic. El seu rang de mesurament és molt ampli i el seu principi de funcionament és independent de les propietats físiques del fluid, si aquest és homogeni.

La finalitat d'aquest projecte és dual, d'una banda recopilar dades que permeten conèixer d'una manera més extensa el comportament d'aquests dispositius, i de l'altra, determinar la fiabilitat de les sondes d'ultrasons com a mètode d'obtenció de caudals i velocitats. Per aconseguir aquests objectius, s'ha desenvolupat una primera part experimental, que ha consistit en el mesurament de cabals en un canal de gran capacitat a Viena, i una segona fase d'anàlisi dels resultats i estudi de les capacitats de cada equip i les pròpies de la instal·lació.

La fase experimental s'ha desenvolupat a les instal·lacions de recerca de la Universitat de Recursos Naturals i Ciències de la Vida (BOKU) de Viena, durant l'any 2014. Concretament s'ha mesurat en un canal de 120 metres de longitud, de secció rectangular de 5 metres d'ample i amb capacitat màxima de fins a 10 m³ / s, que connecta el curs principal del riu Danubi amb el Canal del Danubi, que travessa el centre de la ciutat de Vièna. El canal disposa de tres comportes al llarg d'aquest, la funció és la de controlar els nivells de descàrrega i de calat. Mitjançant la combinació de diferents caudals i calats és possible treballar en un ampli rang operacional amb diverses característiques del flux. És important conèixer la distribució del camp de flux en la secció transversal d'entrada i de sortida de la secció de mesura en tot el rang de funcionament.

Les tres sondes d'ultrasons analitzades són les que es descriuen a continuació:

a) NivuFlow750: transmissor fix per al mesurament de caudals continus, control de caudals i emmagatzematge de valors de mesurament recopilades. Està dissenyat per a l'ocupació en canals oberts, tancats i conduccions amb diverses formes i dimensions. El seu model numèric de descàrrega integrat permet una determinació del caudal de manera més precisa, estable i fiable sota condicions de mesurament difícils.

b) OTT SLD: dispositiu estàtic per al mesurament continu de la velocitat i el nivell del flux. El seu principi de funcionament es basa en l'efecte acústic Doppler, proporcionant uns resultats fiables fins i tot en cas d'inundació o amb una gran càrrega de flotants. Amb un manteniment ràpid i econòmic, el sistema necessita únicament una fixació en un extrem del canal. Equipat amb dos convertidors ultrasònics horitzontals, un processador de senyals intel·ligent analitza els valors de mesura obtinguts a través d'aquests, proporcionant un registrat de dades o un caudal calculat, permetent a l'SLD (Side Looking Doppler) convertir-se en un sistema de mesurament flexible i continu amb múltiples possibilitats d'ús.

c) FlowTracker: cudalímetree d'efecte Doppler de punt únic dissenyat per la mesura de camps de velocitats. La tecnologia es basa en el principi d'ADV (Acoustic Doppler Velocimeter), permetent avantatges diverses com una mesura de la velocitat precisa en un volum de mostra remot, mesuraments en dues o tres dimensions o temps de resposta ràpids. La seva aplicabilitat s'estén a rius, canals oberts, canonades allargades o a instal·lacions de tractaments d'aigües.

Amb tot això, els objectius particulars d'aquest treball són:

1. Estudi i domini en el maneig tant del programari com del maquinari de cadascun dels dispositius a emprar.
2. Obtenció del rang operacional del Canal d'Investigació en funció de la posició de les comportes d'entrada i sortida d'aquest.
3. Mesura del camp de velocitats mitjana a les seccions d'entrada i sortida del tram descobert pels punts d'operacions seleccionats.
 - a. Implementació del mètode velocitat-àrea
 - b. Anàlisi i representació gràfica de les mesures realitzades
4. Presentació del camp de velocitats mesurats en funció del temps i analitzar les turbulències característiques per als punts d'operació seleccionats.
5. Investigació dels efectes del traçat, amb especial detall a la corba anterior a l'entrada al tram descobert, amb i sense cap tipus d'instal·lacions (com canyes o altres correctors del flux).
6. Avaluació del sistema de mesurament de descàrrega NivuFlow750 instal·lat permanentment. Formulació d'un possible mètode de calibratge a partir de les dades obtingudes mitjançant els diferents sistemes de mesura.

Summary

The present work is focused on the study of the behaviour of some ultrasonic commercial probes used in the measurement of rate flows in pipes, flumes and open channels. The application of ultrasonic technics to obtain the flow field and discharge profiles in high-pressure systems or free water surface, presents several advantages. It is a non-intrusive system, without any load losses or moving parts, so these both aspects extend highly the service life. The maintenance is simple and economic. The measurement range is wide and its functional principle is independent to the physical properties of the fluid, if this one is homogeneous.

The finality of this project is dual, on the one hand to recover data in order to know in a more extended way the behaviour of these devices. On the other hand, to determine the reliability of the ultrasonic probes as a method to obtain the discharge and velocity values of water flow. To reach these goals a first experimental phase has been developed, consisted on the measurement of flow rates on a big capacity channel in Vienna, and a second phase of analysis of the results and study of the capacities of each device and the own facility.

The experimental phase has been developed in the research facilities of the University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna (BOKU), built in 2014. Specifically the measurement procedures have been carried out in a 120 meters long channel, with a rectangular section of 5 meters wide and a maximum capacity up to 10 m³/s. The research channel connects the main course of the Danube to the Danube Canal, which crosses the city of Vienna. Three gates are arranged along the channel for discharge and water depth control. By combining the different flow rates and water depths, a wide operating range with various flow characteristics is available. It is important to know the distribution of the flow field at the inlet and outlet cross section of the measurement section over the entire operating range.

The three ultrasonic probes analysed are the following ones described below:

- a) NivuFlow750: a fixed transmitter for continuous flow measurement, flow control as well as for storage of measurement values. It is designed for use in open channels, closed and part full pipes with various shapes and dimensions. Its latest integrated numeric discharge models enable more accurate, more stable and more reliable determination of flow rates even under very difficult measurement conditions.
- b) OTT SLD: a static device for continuous velocity and water depth measurement. Its functional principle is based on the acoustic Doppler effect, giving accurate results even in flood cases or with a high load of waste. With a rapid economic maintenance, the system only needs a fixation on the canal bank. Equipped with two horizontal ultrasonic converters, an intelligent sign processor analyses the measured values obtained through these ones, providing a data recording or a calculated discharge, allowing to the SLD (Side Looking Doppler) device converts into a flexible and continuous measurement system, with multiple possibilities of use.
- c) FlowTracker: a single-point Doppler current meter designed for field velocity measurements. It uses the proven Doppler technology of the Acoustic Doppler Velocimeter (ADV), allowing several advantages such as the accurate velocity measurements in a remote sample volume, 2D or 3D velocity measurements or a rapid response time. Its applicability extends into rivers, open channels, long pipes or water treatment facilities.

The particular goals of this work are the following:

1. to study and domain the handling and operation of both hardware and software for each device used.
2. to explore the operating range of the research channel (RC) as a function of the opening of the inlet and outlet gates.
3. to measure the mean velocity field at the inlet and outlet cross sections for selected operating points
 - a. to implement the velocity area methods
 - b. to analyse and graphically present the measurement results
4. to measure the velocity field time resolved and to analyse the turbulence characteristics for selected operating points
5. to investigate the effects of the bend with and without installations (willows, other



flow straightening installations), with special detail on the bend before the inlet to the open section.

6. to evaluate the permanently installed discharge measurement system NivuFlow750 and to suggest a calibration formula

Palabras clave en español: *Ultrasonidos, Medición, Canal Abierto*

Palabras clave en valenciano: *Ultrasons, Meurament, Canal Obert*

Palabras clave en inglés: *Ultrasounds, Measurement, Open Channel*



ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	OBJETIVOS	2
1.2	MOTIVACIÓN	3
1.3	ANTECEDENTES	4
1.3.1	“Medición de la velocidad y de la descarga del río con perfiladores acústicos Doppler”	4
1.3.2	“Caudalímetros Doppler acústicos: Una propuesta para caracterizar sus parámetros técnicos”	5
2	DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS DE ULTRASONIDOS	6
2.1	EQUIPO 1: NIVUFLOW750	6
2.1.1	Descripción del equipo	6
2.1.2	Componentes	6
2.1.3	Principio de medición del caudal circulante	7
2.1.4	Ventajas e inconvenientes	9
2.1.5	Aplicación en campo	9
2.2	EQUIPO 2: OTT SLD	12
2.2.1	Descripción del equipo	12
2.2.2	Configuración y arranque	13
2.2.3	Principio de medición del caudal circulante	16
2.2.4	Ventajas e inconvenientes	17
2.2.5	Aplicación en campo	17
2.3	EQUIPO3: FLOWTRACKER	20
2.3.1	Descripción del equipo	20
2.3.2	Componentes	20
2.3.3	Principio de medición del caudal circulante	21
2.3.4	Ventajas e inconvenientes	22
2.3.5	Aplicación en campo	23
3	DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES	25
3.1	INSTALACIÓN	25
3.2	LOCALIZACIÓN	27
4	ETAPAS DEL TRABAJO	30
4.1	FASE 1	31
4.1.1	Objetivo	31
4.1.2	Procedimiento	31
4.1.3	Lecturas	32
4.1.4	Distribución temporal	34
4.1.5	Observaciones	37
4.1.6	Diagramas de operación	37
4.2	FASE 2	40
4.2.1	Selección de los puntos de interés	40
4.2.2	Objetivo	40
4.2.3	Procedimiento	41
4.2.4	Condiciones de contorno	42
4.2.5	Obtención de las descargas por el método Velocidad-Área	46
4.2.6	Estudio de las turbulencias en el canal	52
4.2.7	Perfiles de velocidades en sección transversal según sentido del flujo	56
5	CONCLUSIONES	59



6 TRABAJOS FUTUROS.....	60
7 BIBLIOGRAFÍA	61
7.1 REFERENCIAS LITERARIAS	61
7.2 REFERENCIAS EN INTERNET	61
7.3 MANUALES	62

1 Introducción

La utilización de sistemas de medición por ultrasonidos presenta numerosas ventajas de cara a la obtención de perfiles de velocidad y caudales tanto en instalaciones a presión como en lámina libre. Se trata de sistemas no intrusivos, que no producen pérdidas de carga ni disponen de partes móviles, por lo que su vida útil es elevada, con un mantenimiento simple y económico. Su rango de medición es muy amplio y su principio de funcionamiento es independiente de las propiedades físicas del fluido, si éste es homogéneo.

La finalidad de este proyecto es dual, por un lado recopilar datos que permitan conocer de una manera más extensa el comportamiento de estos dispositivos, y por otro, determinar la fiabilidad de las sondas de ultrasonidos como método de obtención de caudales y velocidades. Para lograr estos objetivos, se ha desarrollado una primera parte experimental, que ha consistido en la medición de caudales en un canal de gran capacidad en la Universidad de Recursos Naturales y Ciencias de la Vida (BOKU) en Viena, y una segunda fase de análisis de los resultados y estudio de las capacidades de cada equipo y las propias de la instalación.

Para el desarrollo de la fase experimental se emplean tres modelos distintos de dispositivos de medición por ultrasonido, cuya diferencia reside en sus principios físicos de funcionamiento: **Principio de Correlación**, **Side Looking Doppler** y **Acoustic Doppler Velocimeter**. De esta manera se podrá comparar a su vez distintos dispositivos de ultrasonidos que se encuentran en el mercado.

Por otro lado, el presente proyecto presenta una tercera finalidad, aumentar el registro de datos de manera que favorezca esto el poder conocer de manera más eficiente y certera el funcionamiento del Canal de Investigación, con el fin de facilitar información para futuros experimentos.

1.1 Objetivos

Los objetivos principales a alcanzar con este proyecto son los siguientes:

- a) Estudio y dominio en el manejo tanto del software como del hardware de cada uno de los dispositivos a emplear.
- b) Obtención del rango operacional del Canal de Investigación en función de la posición de las compuertas de entrada y salida de éste.
- c) Medición del campo de velocidad media en las secciones de entrada y salida del tramo descubierto para los puntos de operaciones seleccionados.
 - a. Implementación del método velocidad-área
 - b. Análisis y representación gráfica de las mediciones realizadas
- d) Presentación del campo de velocidades medida en función del tiempo y analizar las turbulencias características para los puntos de operación seleccionados.
- e) Investigación de los efectos del trazado, con especial detalle a la curva anterior a la entrada al tramo descubierto, con y sin ningún tipo de instalaciones (como cañas u otros correctores del flujo).
- f) Evaluación del sistema de medición de descarga NivuFlow750 instalado permanentemente. Formulación de un posible método de calibración a partir de los datos obtenidos mediante los distintos sistemas de medición.
- g) Valoración del empleo de ultrasonidos como método eficaz de obtención de perfiles de velocidades y descargas.

1.2 Motivación

La motivación principal de este proyecto lo marca la oportunidad de poder desarrollar el Trabajo Final del Máster en una ciudad extranjero, más concretamente en Viena, gracias a una beca Erasmus+. Ante la posibilidad de poder elegir ese destino, me puse en contacto con la Universidad de Recursos Naturales y Ciencias de la Vida (BOKU) con la idea de aprovechar la estancia de la manera más productiva posible, pudiendo desarrollar un proyecto que resultara interesante para ambos. Finalmente conseguí ponerme en contacto con el departamento de Ingeniería Hidráulica a cargo de la Dra. Christine Schindelar, que fue mi referencia allí desde ese momento, junto al Dr. Petr Litchneger.

La elección del proyecto vino marcada por la necesidad de la Universidad de BOKU de llevar a cabo la mayor cantidad de mediciones posibles en el canal de investigación construido en 2014, con la finalidad de poder albergar experimentos hidráulicos (generación eléctrica) , hidrológicos (estudio de la variación del lecho de los ríos) o de carácter naturalistas (creación de vías alternativas para peces migratorios frente a grandes obstáculos artificiales).

Al ser el primer equipo de medición establecido para comenzar el proyecto un dispositivo de ultrasonidos, se propuso realizar todas las etapas del proyecto con este tipo de sondas, de manera que se pudiera centrar la investigación en un tipo de sistema de medición. Surge así la interesante oportunidad de poder realizar un trabajo con peso tanto práctico como teórico. Con todo ello, se establecieron unos hitos a cumplir antes de terminar la estancia, cuya duración fue de 5 meses, de manera que pudiera tener material suficiente para trabajar.

Este proyecto me ha brindado la oportunidad de poder compaginar la realización del Trabajo Final del Máster con vivir una experiencia diferente, en un entorno más europeo, mejorando mi formación tanto profesional, en lo relativo al Máster o los idiomas, como en lo personal.

1.3 Antecedentes

Es frecuente el empleo y estudio de los dispositivos de ultrasonidos a la hora de buscar hallar el caudal de un canal abierto o un río. Algunos trabajos realizados con anterioridad hablan sobre el empleo de ultrasonidos en ríos o canales abiertos.

1.3.1 “Medición de la velocidad y de la descarga del río con perfiladores acústicos Doppler”

Thomas H. Yorke y Kevin A. Oberg, han llevado a cabo la descripción de los principios de funcionamiento, la aplicación de los perfiladores acústicos Doppler (dispositivos montados en pequeñas embarcaciones como catamaranes o lanchas motoras) para medir la velocidad y la descarga, y la calibración y las cuestiones de verificación de éstos. Según su estudio, el empleo de los perfiladores acústicos se inició en la década de los 80 con el fin de medir la velocidad de un barco en movimiento. Con el transcurso de los años los sistemas fueron mejorándose.

A la hora de realizar las mediciones, el dispositivo se montaba en un bote motorizado que navegaba de manera perpendicular a la corriente del río, atravesando la sección transversal de éste, tomando muestras con distintas señales, de manera que era posible comprobar la calidad de medición si la media de los valores tomados no se desviaba más del 5%.

Sin embargo, pese a que el modelo Doppler había reemplazado a otras técnicas de medición por el principio velocidad-área, consideran que estaba limitado en algunos casos, como en las mediciones cerca de la superficie, en el lecho o en los flancos del río. Sin embargo, el software suministrado con los instrumentos incluye algoritmos para estimar la velocidad y la descarga en las zonas no medidas.

Consideran que la capacidad de calibrar perfiladores Doppler acústicos es limitada debido a la pared lateral y la interferencia de fondo en la mayoría de los tanques de remolque; Sin embargo, las mediciones de caudal son verificados por comparación con las mediciones realizadas con técnicas tradicionales de área-velocidad.

1.3.2 “Caudalímetros Doppler acústicos: Una propuesta para caracterizar sus parámetros técnicos”

El trabajo desarrollado en este documento buscaba ser capaz de detectar y medir la velocidad de uno o varios objetivos en aguas tranquilas. Esos objetivos eran flujos cargados de material reflectante, que circulaba por pequeños tubos de PVC .

El experimento consistía en un sensor que se movía alrededor de los conductos para encontrar las posiciones en las que la velocidad de la corriente se medía correctamente. Un sensor fijo y una combinación de corrientes en diferente posición relativa se utilizaron para investigar el procesamiento de espectro Doppler.

Finalizado el experimento, se concluyó que los parámetros intrínsecos de la velocidad medida por Doppler(ángulo de emisión, anchura de haz, rango) deben ser considerados junto con información sobre el sistema hidráulico de los sitios candidatos de medición, para evaluar si un sensor en particular es adecuado para un sitio en particular. Se han desarrollado una instalación y unos procedimientos de laboratorio específicos para la evaluación de estos parámetros, y se aplica a una variedad de caudalímetros disponibles.

Por lo tanto, no se puede asegurar que puedan trabajar con la misma eficiencia en distintas condiciones. Si embargo sí que demostraron la viabilidad técnica de la descripción de las características de los sensores Doppler sobre una base común.

2 Descripción de los equipos de ultrasonidos

2.1 EQUIPO 1: NivuFlow750

2.1.1. Descripción del equipo

El **NivuFlow750**, desarrollado por la empresa NIVUS, es un sistema de medición de caudales no portátil, concebido preferiblemente para realizar mediciones en líquidos acuosos de varias composiciones. Puede ser empleado tanto en tuberías a carga parcial como a carga total (en carga), como en canales de distintas formas y dimensiones.

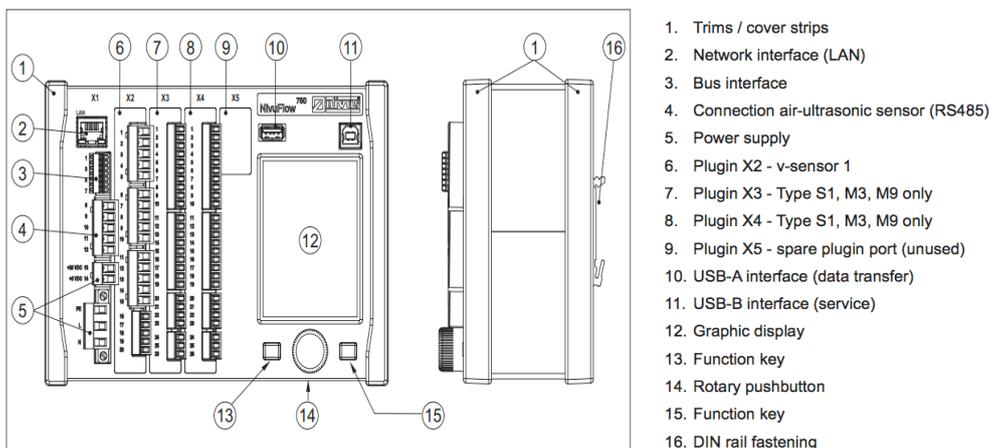


Imagen 1. Vista general y descripción del producto (" Instruction Manual" - NIVUS)

2.1.2 Componentes

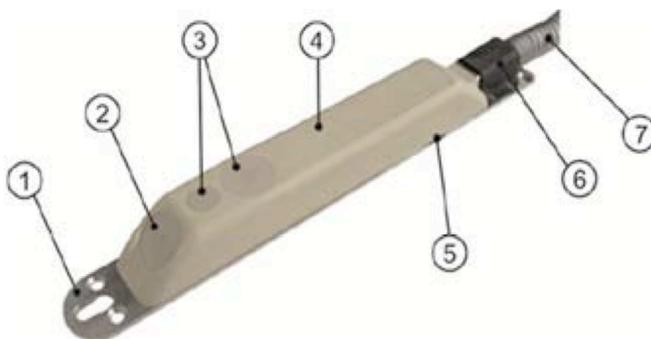
El dispositivo consta de distintos sensores fijos en función de la finalidad de cada uno de ellos. A continuación se presentan los utilizados en el proyecto:

- **Sensor de nivel NIVUS (i-Sensor):** sensor de nivel externo (fuera del medio), envía una señal aérea (de entre 4 y 20mA) desde su posición hacia abajo (la superficie del agua). Se emplean sensores "i-3" para la obtención de los niveles del agua a excepción de valores bajos, de manera opcional. (Imagen 2)



Imagen 2. Sensor de nivel "i-3"

- **Sensor de velocidad NIVUS (CS2):** sensores de velocidades y niveles, cuyo principio de funcionamiento se basa en el uso de ultrasonidos acuáticos, con el método de tiempo transcurrido, o mediante un nivel hidrostático. Se encuentran dentro del flujo. (.)



- 1 Placa de montaje
- 2 Sensor para medida de caudal
- 3 Sensores de nivel por ultrasonidos
- 4 Cuerpo del sensor
- 5 Sensor de nivel por presión
- 6 Cubierta
- 7 Protección de cableado

2.1.3 Principio de medición del caudal circulante

La obtención directa del caudal no es posible, para ello se precisa conocer los valores de velocidad media del flujo para cada sonda (V_i) y la sección transversal del flujo (A). El valor del caudal del flujo viene determinado por la siguiente ecuación:

$$Q = A \cdot V$$

- **Sección transversal del flujo (A):** Considerando la forma del canal, el único valor fluctuante es el nivel del flujo. Para ello el sensor de nivel recogerá cada
- **Velocidad (V):** El método de determinación de la velocidad de flujo está basado en el principio de reflexión ultrasónica. Mediante la transmisión de impulsos ultrasónicos en un ángulo definido es posible escanear los elementos reflectantes en el flujo (partículas, minerales o burbujas de aire).

El **Principio de Correlación** desarrollado por NIVUS es uno de los métodos de obtención de velocidades del caudal más modernos y eficientes en la actualidad. Su funcionamiento se basa en la toma de una primera imagen o muestra grabada por un procesador de señal digital (PSD) incorporado en el propio dispositivo, a partir del eco producido y recibido por la reflexión ultrasónica (Ilustración 1). Transcurridos apenas unos milisegundos se realiza un segundo escaneado (Ilustración 2) quedando grabada también como muestra de eco.

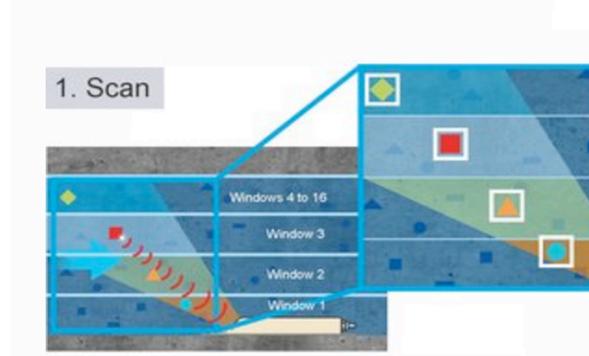


Ilustración 1. Primer escaneado ("Brochure Nivu Flow 750" -NIVUS)

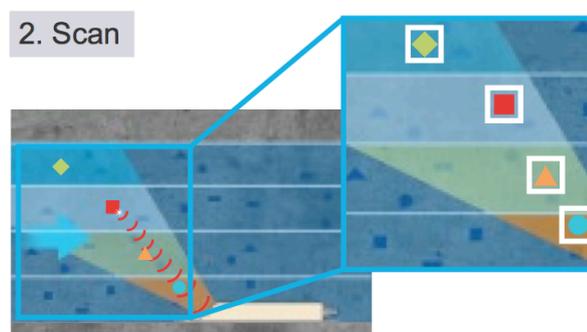


Ilustración 2. Segundo escaneado ("Brochure Nivu Flow 750" -NIVUS)

Mediante la correlación de ambas imágenes o ecos (Ilustración 3), podremos determinar el movimiento en el tiempo de los elementos del medio, al comparar el cambio de posición de cada uno de ellos en los distintos instantes en los que se realizar el escaneado. De esta manera podemos obtener la velocidad directamente.

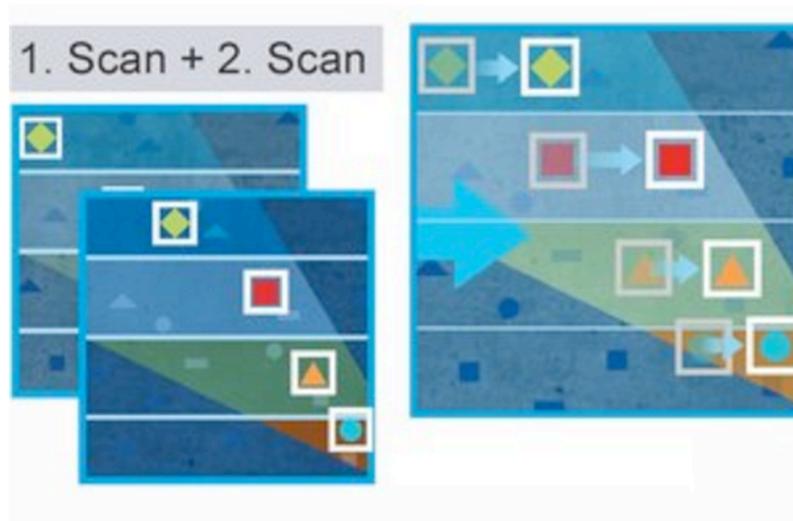


Ilustración 3. Correlación entre ambas señales ("Brochure Nivu Flow 750" -NIVUS)

2.1.4 Ventajas e inconvenientes

- **Ventajas:**
 - Gran exactitud a través de la evaluación de los perfiles de velocidad
 - Fácil verificación de las velocidades a diferentes profundidades
 - Integración de la medición de la altura
 - Adecuado para grandes secciones de caudal
 - Costes de montaje bajos
 - permite tener en cuenta los depósitos acumulados
- **Inconvenientes:**
 - Requiere partículas, minerales o burbujas en el medio

2.1.5 Aplicación en campo

La sección de medición es de 2 m aguas arriba de la curva previa a la sección de pruebas abierta y está equipada con tres sensores de velocidad CS2 y un sensor i3

de nivel colocado en el techo del canal (Imagen 3). La medición del nivel de agua por i3 (o en los niveles de agua más bajos, por medio de una sonda CS2) se utiliza, como se mencionó anteriormente, para la determinación de la sección transversal de flujo ($A = BH$). La medición por tres sondas CS2 proporciona una base para la determinación de la velocidad de flujo promedio, o tres velocidades de profundidad promediada. La velocidad de caudal se determina como sigue:

$$Q = A \cdot V = A (k_1 V_1 + k_2 V_2 + k_3 V_3)$$

Cada velocidad V_i participa de manera proporcional a un coeficiente de ponderación del flujo total específico, denominado k_i . La velocidad de la profundidad promediada se calcula como una aproximación de un perfil de $V(h)$. Dependiendo de la profundidad del agua y de la calidad de la señal se pueden medir hasta 16 valores de velocidad y profundidad por el sensor de velocidad. Hay un total de hasta 48 valores de velocidad que representan una base de datos para el análisis de la distribución de velocidad en la sección transversal de flujo y para la integración de la corriente. El intervalo de almacenamiento es de 30 segundos.



Imagen 3. Instalación del equipo NivuFlow750 en el canal.

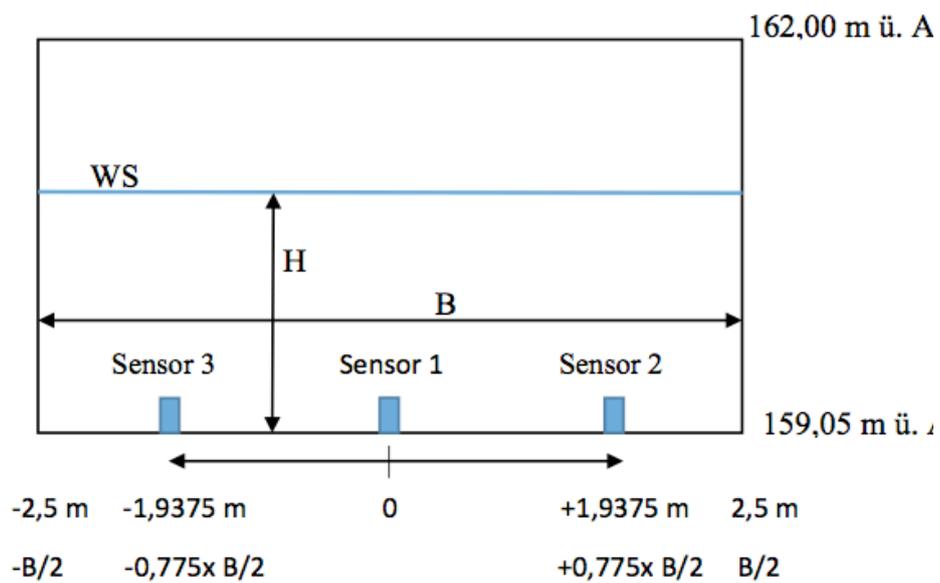


Ilustración 4. Esquema de instalación

A partir de los datos recogidos se conformo el siguiente perfil de velocidades de flujo:

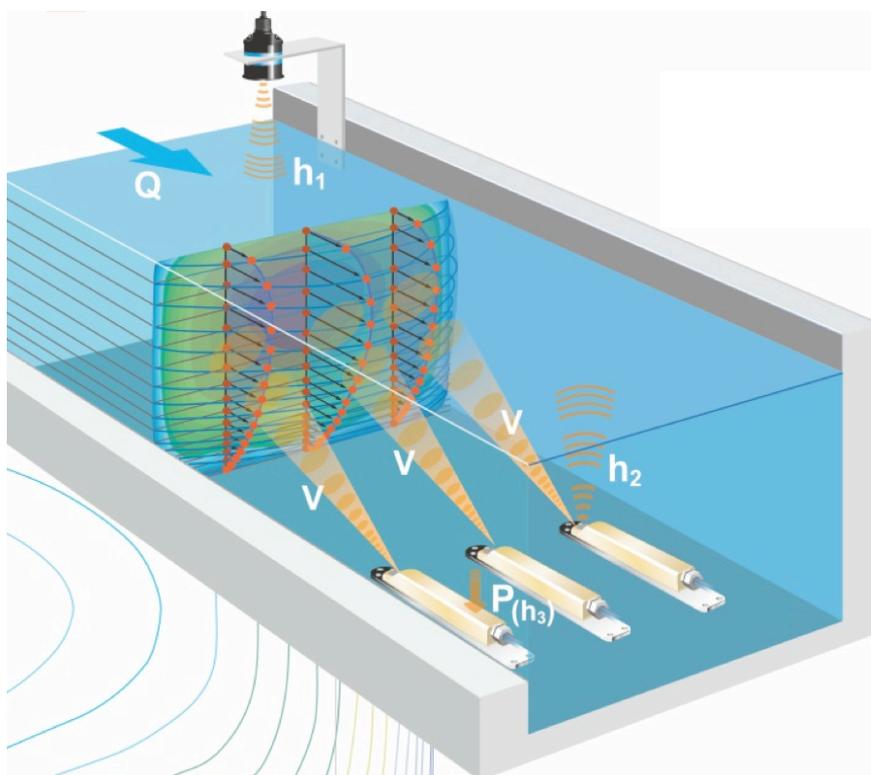


Imagen 4. Representación del perfil de velocidades de flujo a partir de los datos obtenidos.

2.2 Equipo 2: OTT SLD

2.2.1. Descripción del equipo

La sonda **Side Looking Doppler** de OTT es un dispositivo de funcionamiento estático para la medición continua de la velocidad de fluidez y el nivel en aguas que fluyen. Es un sistema de bajo consumo, con resultados fiables incluso bajo condiciones complejas como inundaciones o grandes cargas de materia flotante.

Gracias al empleo de dos haces ultrasónicos horizontales, el dispositivo es capaz de detectar las dos componentes del vector velocidad del flujo, es decir, es capaz de detectar tanto la componente principal como la transversal del flujo, permitiendo a su vez el estudio del efecto de las turbulencias. Estos haces ultrasónicos son dos convertidores dispuestos en forma convexa o cóncava en el cabezal del sensor. Envían señales de manera horizontal en el agua hasta que se genera una señal de eco que vuelve al convertido.

Fig. 3: grupos constructivos del OTT SLD

- 1 – Cabezal del sensor
- 2 – Carcasa del sensor
- 3 – Extremo con hembrilla de conexión

La figura muestra el modelo de equipo "Discharge" (magnitud de medida: velocidad de fluidez y caudal); frecuencia: 1,0 MHz; instalación horizontal; interfaz RS-422/RS-485 (protocolo SDI-12).



Imagen 5. Detalle de modelo horizontal ("Instrucciones abreviadas OTT SLD" - OTT)

2.2.2 Configuración y arranque

La sonda SLD sigue la siguiente el siguiente esquema de instalación:

a) Configuración de los parámetros de servicio

Sensor-> Cable->PC/alimentación de tensión

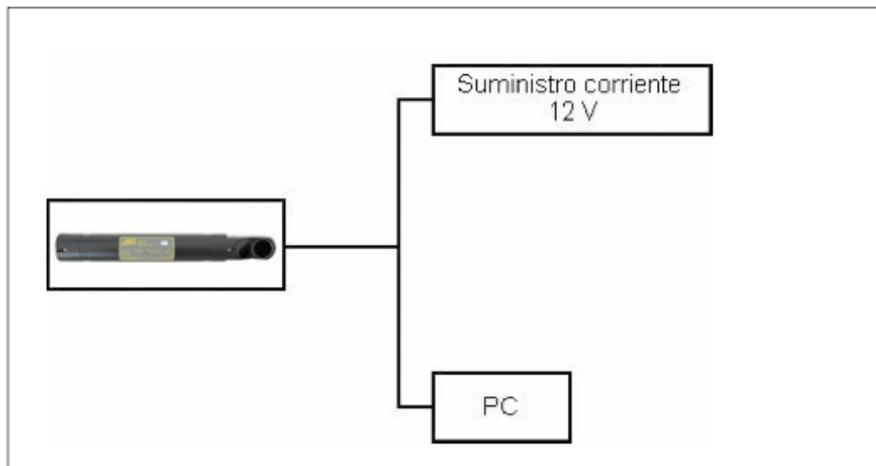


Figura 1. Esquema de configuración ("Instrucciones abreviadas OTT SLD" – OTT)

b) Medición

Sensor –>Cable –>Registrador de datos/alimentación de tensión

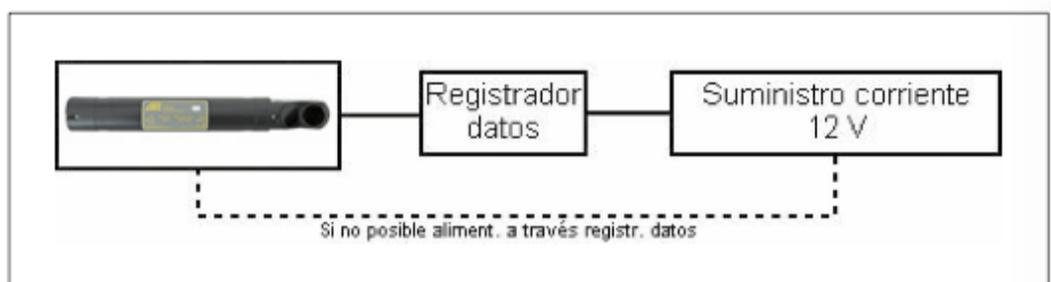


Figura 2. Esquema de medición("Instrucciones abreviadas OTT SLD" - OTT)

A través del software instalado en una tableta portátil (Imagen 6) se accede a la interfaz del programa donde se gestiona el uso de la sonda. Una vez accedido al programa de la empresa, llevaremos a cabo una serie de pautas para asegurar el correcto funcionamiento de la sonda y de la grabación de los datos:

- **Comprobación de la comunicación:** seleccionar el puerto correspondiente a cada sonda instalada.
- **Programación del registro de datos:** seleccionar rutas y nombres para los archivos.
- **Calibración del sistema:** calibrar el sensor de presión para referenciar correctamente el nivel del agua.
- **Ajuste de los parámetros de servicio** (Figura 3): seleccionar valores como la frecuencia acústica, el intervalo de medición, la orilla en el sentido del flujo, el tiempo medio para medir, el tamaño de la células y la zona muerta (*blanking*) (Figura 4).



Imagen 6. Tableta con software de ejecución

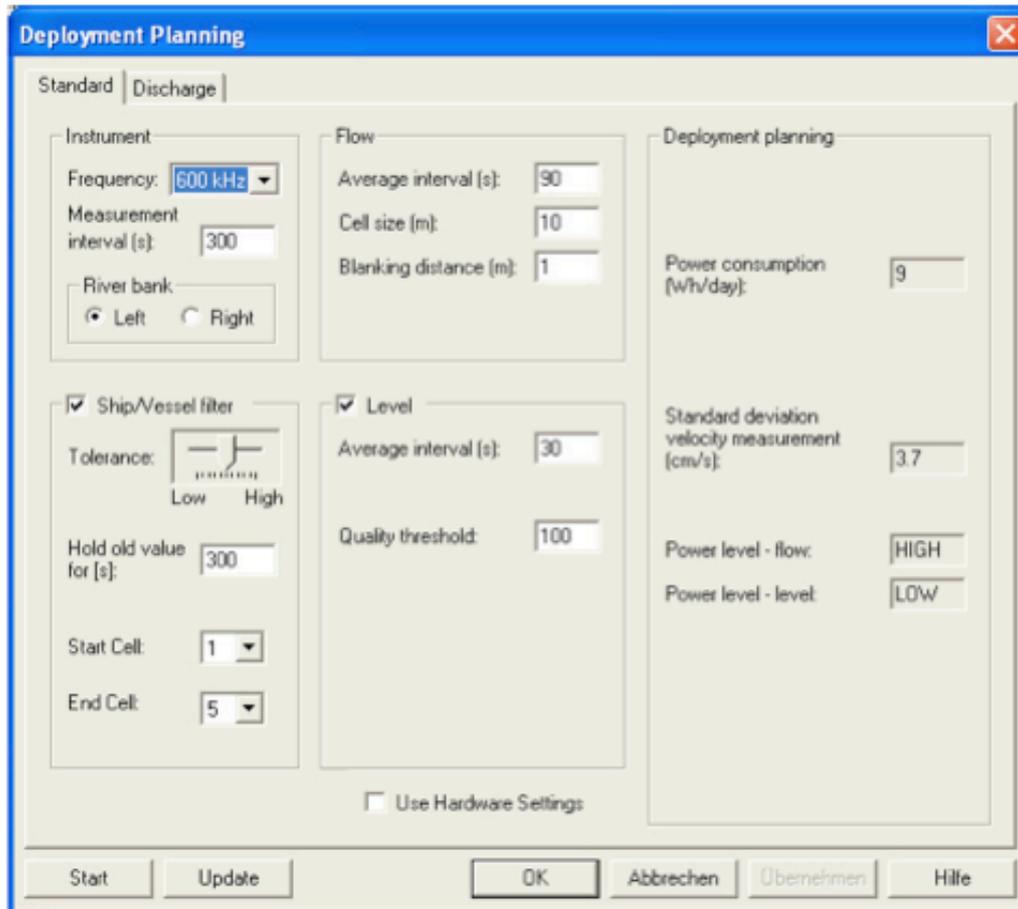


Figura 3. Función "Ajustes de parámetros" ("Instrucciones abreviadas OTT SLD" - OTT)

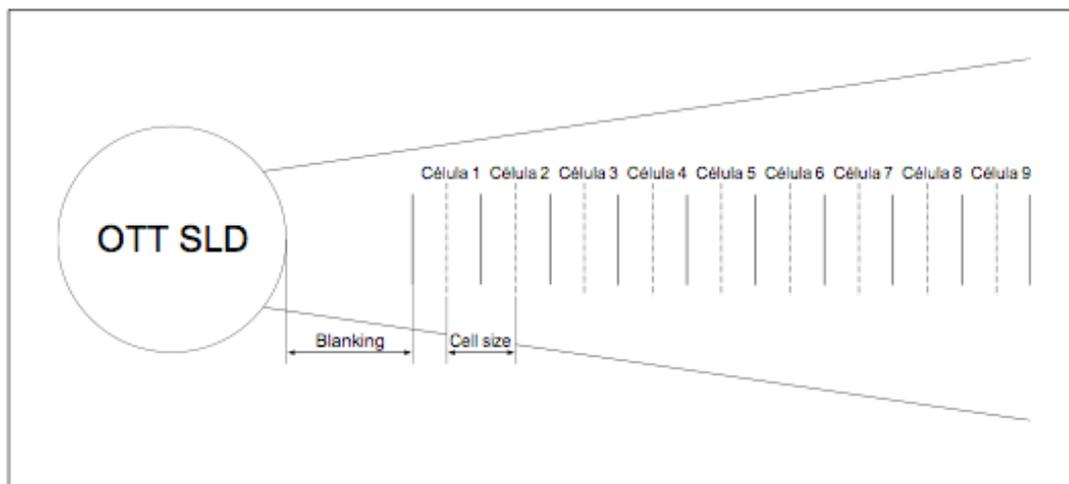


Figura 4. Esquema de células y "blanking" ("Instrucciones abreviadas OTT SLD" - OTT)

2.2.3 Principio de medición del caudal circulante

El principio de medición por efecto Doppler se basa en el efecto de compresión-descompresión de la onda de un cuerpo en movimiento respecto a un punto fijo. En este caso, un emisor fijo transmite con continuidad un haz de ultrasonidos con una frecuencia y un ángulo definidos. Si la señal enviada se encuentra con algún elemento en el flujo (partículas, burbujas, etc.), una parte de su energía será reflejada, ocasionando un cambio de frecuencia en la propia señal proporcional de manera directa a la velocidad del flujo en el volumen de medida considerado.

Por otra lado, de manera interna, la sonda mide los tiempos de recorrido de las señales. Con esto consigue determinar las distancias recorridas por los ecos que vuelven y asignar así velocidades del flujo a distintas celdas de medición. En total son nueve celdas (Figura 4).

Por tanto, el método basado en el efecto Doppler identificado en hasta 9 ventanas de medida, los vectores de velocidad, que se pueden establecer con cierto margen de distancia a la sonda y a la pared opuesta.

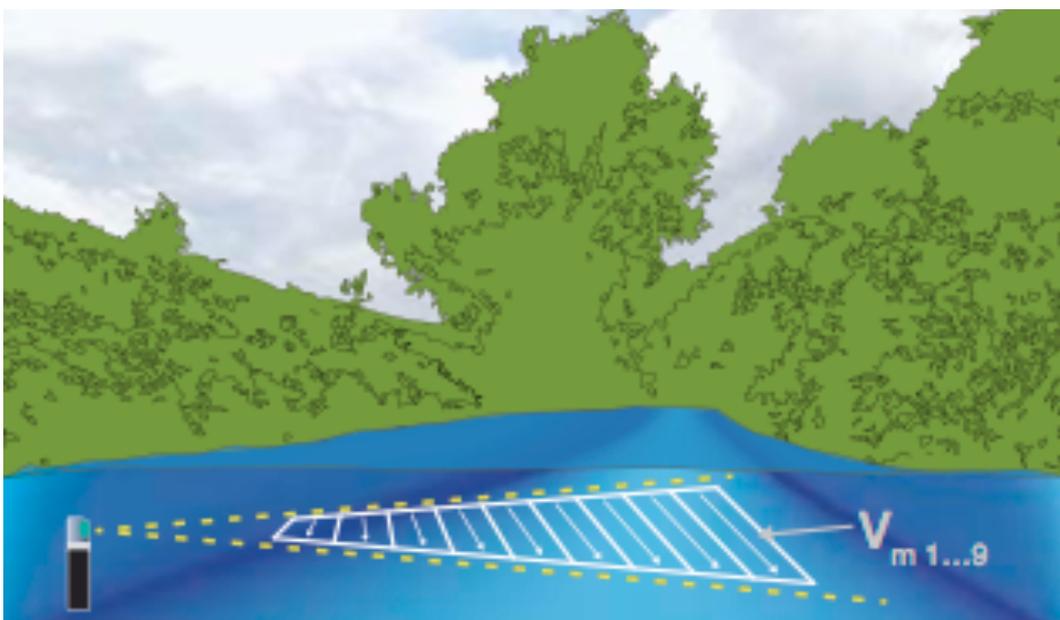


Figura 5. Distribución de celdas. Efecto Doppler ("Instrucciones abreviadas OTT SLD" – OTT)

2.2.4 Ventajas e inconvenientes

Ventajas:

- Consumo de energía optimizado
- Cálculo flexible de caudal, integrado o en el registrador de datos
- Fácil integración en sistemas de control de procesos vía Modbus
- Valores fiables incluso en caso de crecidas
- Para masas de agua que fluyen de tamaño pequeño a mediano
- Alta precisión de medición (± 3 mm)
- Resistente a la oscilación de la presión atmosférica

2

Inconvenientes:

- Necesidad de partículas o burbujas en el medio
- Desconocimiento del punto exacto donde se miden las velocidades

2.2.5. Aplicación en campo

Se disponen de dos sondas portátiles desmontables, cuya instalación se realiza en los extremos de la sección de pruebas abierta, cada vez que se va a realizar alguna medición con estos dispositivos. La primera sonda, a la que llamamos COM8, se instala en el tramo inicial de la sección abierta, tras la curva, y la segunda sonda, denominada COM11, queda instalada en el tramo final, sobre el lecho de grava. A continuación se señala en la vista en planta de la instalación la localización de ambas.(Figura 6)

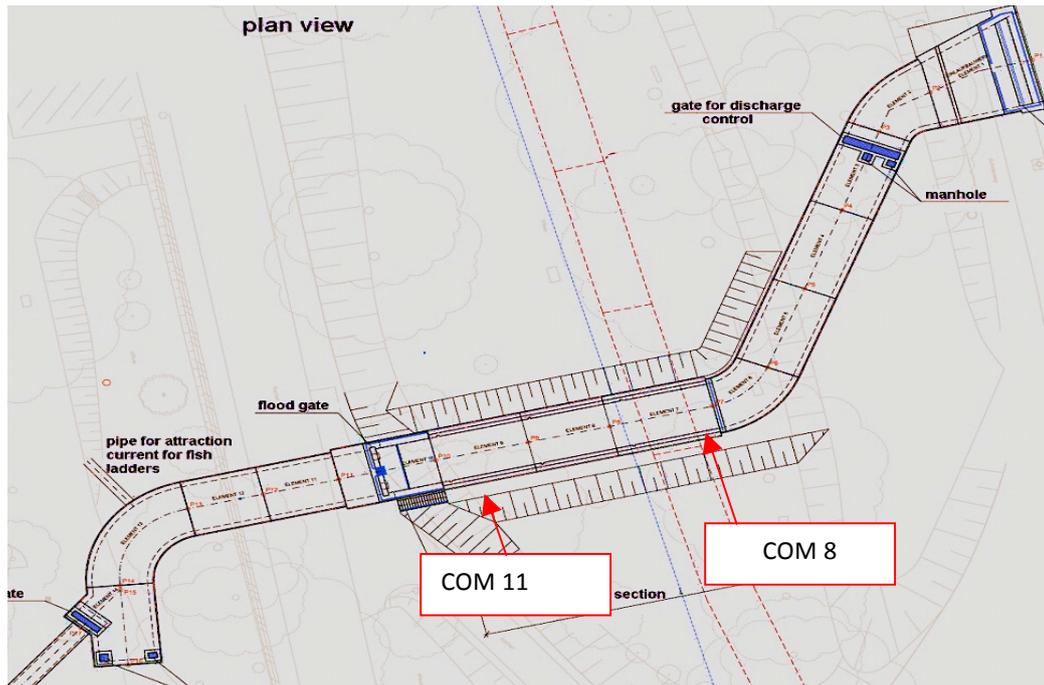


Figura 6. Distribución en planta de las sondas en el canal de investigación

En cada posición se encuentra un carril vertical equipado con un sistema de polea-manivela que permite elevar y bajar un soporte metálico con sistema de sujeción por apriete que sostiene a las sondas (Imagen 7). Este mecanismo (Imagen 8) permite posicionar el dispositivo a cualquier altura en la que se quiere llevar a cabo una medición (Imagen 9).



Imagen 7. Detalle de sonda en soporte

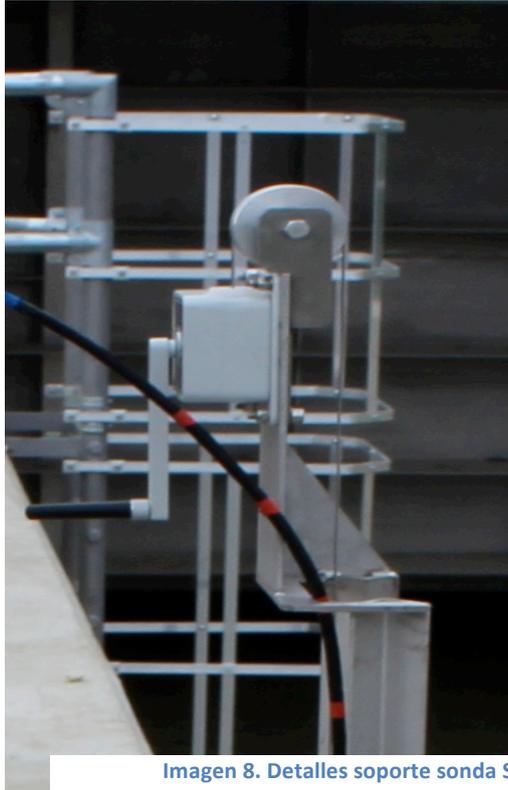


Imagen 8. Detalles soporte sonda SLD OTT COM8

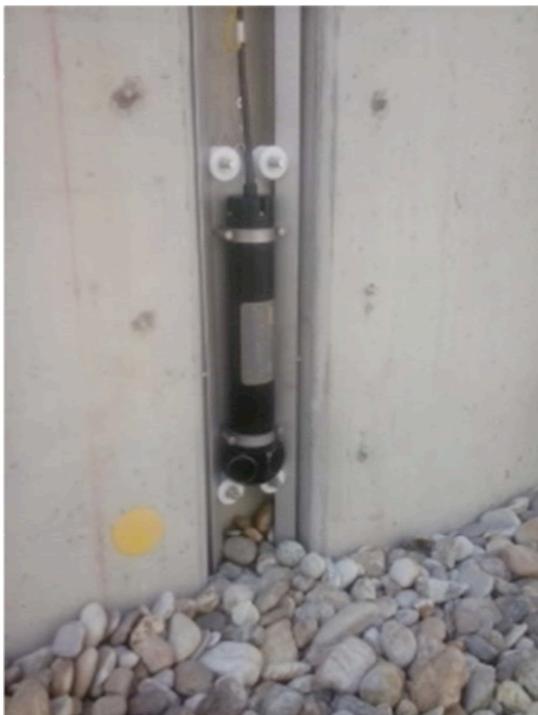


Imagen 9. Detalle soporte COM11 (con suelo de grava)

2.3 Equipo3: FlowTracker

2.3.1. Descripción del equipo

El dispositivo de medición FlowTracker, desarrollado por SonTek, está diseñado para una gran variedad de aplicaciones de monitorización, como la medición del caudal de descarga de ríos y canales abiertos, grandes conducciones y de instalaciones de tratamiento de aguas.

La sonda presenta una gran simplicidad a la hora de operar con ella, ya que viene incluido un monitor con teclado e instrucciones a cada paso. No requiere de un ordenador para poder recopilar la información, el propio sistema va almacenando volúmenes de datos para períodos de tiempo definidos. Presenta a su vez la ventaja de poder introducir parámetros para documentar los datos. Toda la información se guarda en archivo interno que puede ser descargado a posteriori.

2.3.2. Componentes

El dispositivo está conformado por los siguientes componentes:

Sonda (Imagen 10): contiene los elementos acústicos empleados para la medida de la velocidad.

Controlador de mano (Imagen 10): contiene la electrónica de procesado, las baterías, el teclado y una pantalla LCD.

Alimentación externa/conector de comunicación(Imagen 10): doble conexión de alimentación y comunicación, a prueba de agua.



Imagen 10. Sonda FlowTracker ("FlowTracker Technical Manual" -SonTek ft. SmatQc)

2.3.3. Principio de medición del caudal circulante

El dispositivo FlowTracker emplea una adaptación del principio de Doppler para medir la velocidad en el agua. El principio de Doppler dice que si una fuente de sonido se mueve de manera relativa a un receptor, la frecuencia del sonido cuando llega al receptor está desplazada con respecto a la frecuencia del transmisor.

Con esa premisa, y contando con una sonda FlowTracker bi-estática (los transductores son empleados como transmisores y receptores), donde el transmisor concentra el sonido en un pequeño haz y el receptor es sensible a éste, se puede crear un volumen de agua localizada a una distancia fija de la punta de la sonda, donde intersectan los haces. Esa intersección determina la localización del volumen de muestra (Imagen 11).

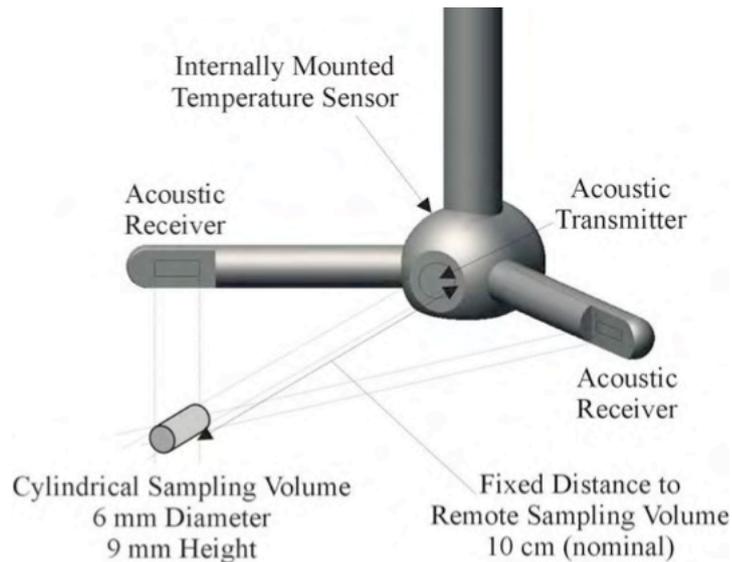


Imagen 11. Modelo de Volumen de Muestra de Sonda FlowTracker

Por lo tanto, establecido el volumen de muestra, el cálculo de la velocidad se inicia con una generación de un pulso acústico corto de frecuencia conocida por parte del transmisor. El sonido viaja a través del agua a lo largo de los ejes del haz, recorriendo todo el volumen de muestra y siendo reflectado hacia todas las direcciones por acción de las partículas de la materia (sedimentos, pequeños organismos, burbujas). Una porción del sonido reflectado vuelve de nuevo al eje del haz del receptor y es tomado como muestra. El dispositivo mide la diferencia de frecuencias (el cambio) en cada receptor. Ese cambio es proporcional a la velocidad de las partículas a lo largo de los ejes bi-estáticos del receptor y el transmisor. El eje bi-estático está localizado a media distancia entre los ejes del transmisor y el receptor. Saber la orientación relativa de los ejes bi-estáticos permite a la sonda calcular la velocidad del agua.

2.3.4. Ventajas e inconvenientes

Ventajas:

- Medida precisa de la velocidad en un volumen de muestra remoto
- Factor de calibración invariante, sin necesidad de recalibración
- Respuesta rápida en el tiempo
- Operaciones simples
- Excelente rendimiento tanto en altos como en bajos flujos
- Sensor de temperatura incorporado

Inconvenientes:

Inservible para circuitos cerrados

Complejidad de manejo ante caudales elevados

2.3.5. Aplicación en campo

El cuadálímetro debe introducirse en el flujo ayudado por un soporte escalado, de manera que permita conocer la altura de la medida y poder cambiar de posición con el fin de variar las condiciones de ésta.



Imagen 12. Utilización de equipo FlowTracker en un cauce de río ("Nevada Water Science Center")

Las mediciones se llevan a cabo en la sección abierta, en el sector con suelo de grava (Imagen 13). Se debe bajar al canal equipado con un mono impermeable y un sistema de seguridad compuesto por un arnés y una cuerda cuyo extremo se encuentra en el exterior, atendido por otro compañero:



Imagen 13. Lecho de grava. Punto de medición con la sonda FlowTracker.

3 Descripción de las instalaciones

3.1 Instalación

En el año 2014, la Universidad de Recursos Naturales y Ciencias de la Vida, BOKU (<http://seddon.boku.ac.at>), llevó a cabo la construcción de unas exclusivas instalaciones al aire libre como el primer paso de un ambicioso proyecto con el que poder realizar estudios, tanto hidráulicos como hidrológicos, a una gran escala y dentro del ámbito de la investigación universitaria, de manera experimental.

El Canal de Investigación donde se desarrolló la fase experimental de este experimento presenta una sección rectangular de 5 metros de ancho y una longitud de 120 metros. Con una capacidad de hasta $10 \text{ m}^3/\text{s}$, el canal puede ser usado para trasvasar agua del curso principal del Danubio hasta el Canal del Danubio (o *Donaukanal*), permitiendo llevar a cabo diferentes investigaciones a una gran escala y bajo condiciones controladas.

En su mayoría se trata de un conducto cerrado por debajo del nivel del suelo, a excepción de una tramo de medición abierto, de unos 30 metros de longitud aproximadamente, donde se llevan a cabo los experimentos.

Tres compuertas de regulación están distribuidas a lo largo del canal: Compuerta de Entrada (*Inlet Gate*), Compuerta de Inundación (*Flood Gate*) y Compuerta de Salida (*Outlet Gate*).

A continuación se muestra una vista en planta de la distribución del canal, destacando los elementos principales de éste:

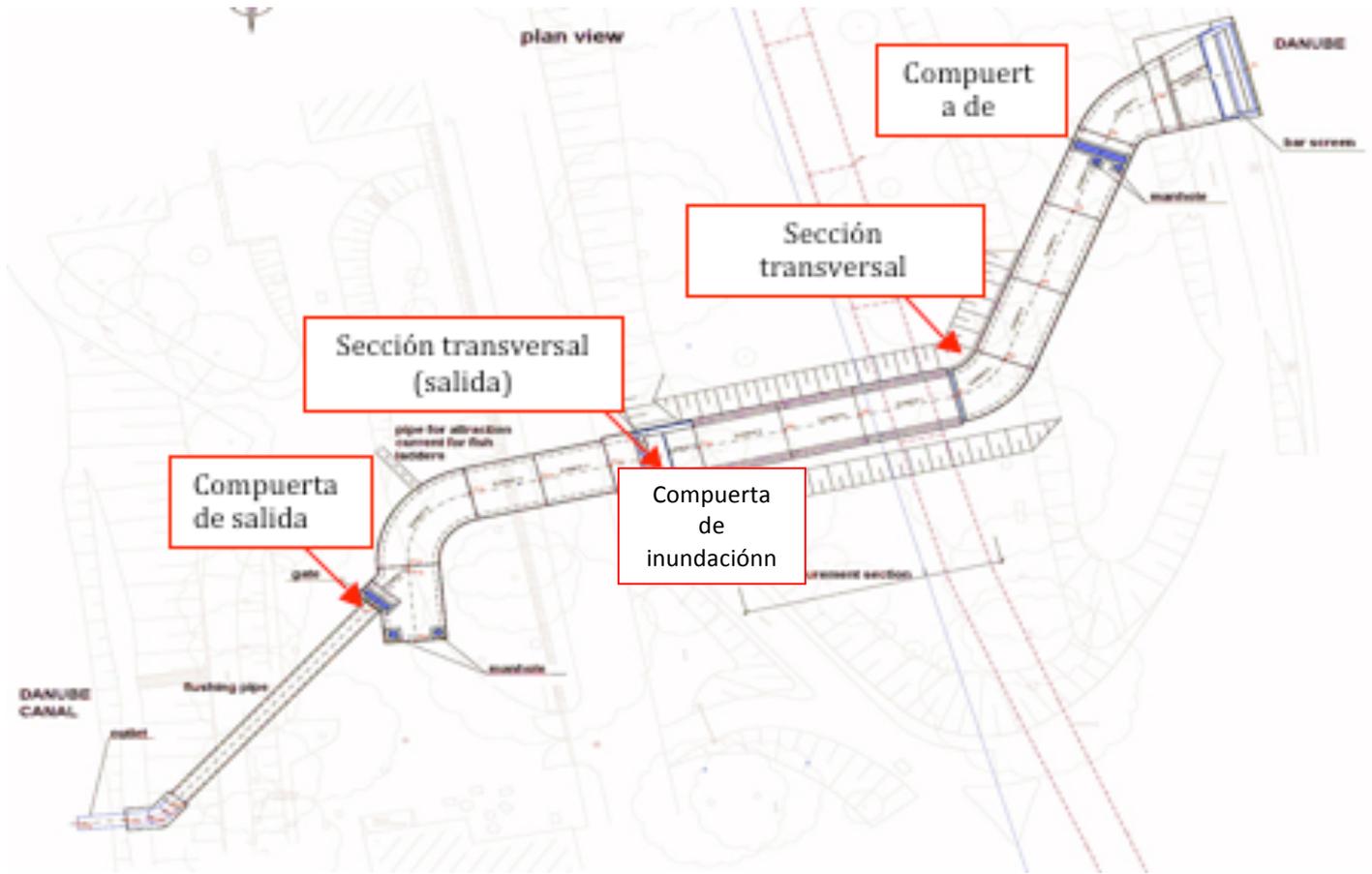


Figura 7. Distribución en planta del canal de investigación

Mediante la combinación de diferentes caudales y calados es posible trabajar en un amplio rango operacional con varias características del flujo. Es importante conocer la distribución del campo de flujo en la sección transversal de entrada y de salida de la sección de medición en todo el rango de funcionamiento.

La instalación presenta también 4 sondas de nivel y dos indicadores de turbiedad, en la distribución siguiente.

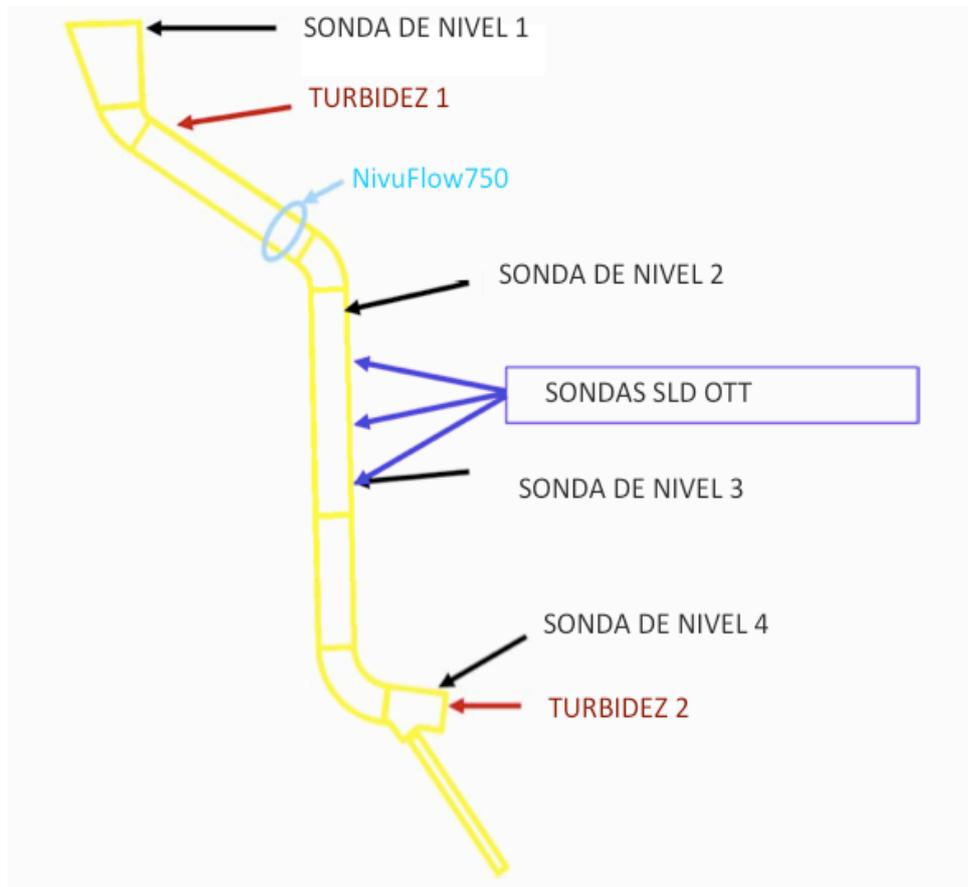


Ilustración 5. Distribución de elementos instalados en canal.

3.2 Localización

La Universidad BOKU está situado en la ciudad Viena, capital de Austria, en el centro de Europa, a unos 170 metros de altitud media sobre el nivel del mar Adriático, con un clima húmedo continental, un régimen de lluvias alto, sin meses secos, y con unas temperaturas muy variadas del verano (máximas de hasta 37°C) al invierno (mínimas de hasta -20°C). El río Danubio lleva a su paso por la ciudad un caudal promedio de 1900 m³/s.

El Canal de Investigación se localiza, más concretamente, entre el río Danubio y su bifurcación, el conocido como Canal del Danubio o *Donaukanal* en su nombre original. En una localización privilegiada, donde se separan estos dos cauces aparece un pequeño islote que recogía las condiciones idóneas para llevar a cabo la construcción de esta instalación.

Se muestra a continuación unas vistas aéreas del canal recogida vía satélite en Google Maps



Imagen 14. Vista aérea de la bifurcación del río Danubio y el Donaukanal (Google Maps)



Imagen 15. Vista aérea del Canal de Investigación con mayor detalle(Google Maps)

4 Etapas del trabajo

El plan de trabajo establecido presenta las siguientes etapas:

- 1) FASE 1: Experimentación en el Canal de Investigación basados en la exploración del rango operacional del canal.
 - a. Apertura de Compuerta de Entrada
 - b. Apertura de Compuerta de Salida
 - c. Adquisición de toda la información relevante al canal (Q,H,V, Niveles del agua, etc.)
 - d. Evaluación
- 2) FASE 2
 - a. Selección de los puntos de interés
 - b. Obtención de perfiles de velocidad (en relación al espacio y el tiempo) en las secciones de entrada y salida al tramo abierto mediante el dispositivo SLD de OTT.
 - i. Con la instalación de cañas (tan pronto como sea posible)
 1. Campos de flujo principales a la entrada y a la salida
 2. Descarga (implementación del método velocidad-área)
 3. Turbulencias
 4. Evaluación de las corrientes secundarias
 - ii. Sin la instalación de cañas (12-2015 apróx.)
 1. Campos de flujo principales a la entrada y a la salida
 2. Descarga (implementación del método velocidad-área)
 3. Turbulencias
 4. Evaluación de las corrientes secundarias
 - c. Investigación de los efectos de la curva con y sin instalaciones.
 - d. Estimación de la precisión de descarga (NivuFlow750) y desarrollo de una fórmula de calibración apropiada.
- 3) FASE 3: Escribir el proyecto.

4.1 FASE 1

4.1.1 Objetivo

La primera fase de este proyecto consiste en la exploración del rango de operación del Canal de Investigación, con el objetivo de lograr conocer las condiciones que se podrían generar dentro del canal (Caudal, Altura y Velocidad) en función de la posición de las compuertas y del nivel del río Danubio.

El objetivo final es construir unas gráficas que nos permitan aproximarnos a las condiciones que consideremos apropiadas.

4.1.2 Procedimiento

Mediante el panel de control del canal somos capaces de indicar la posición de la compuerta que queremos manipular (en mm respecto del suelo).

El rango máximo de apertura de las puertas es el siguiente:

COMPUERTA	Pos. Máx.(mm)
ENTRADA	2800
ANTI-IUNDACIÓN	3250
SALIDA	1500

Procedemos entonces a operar con las compuertas, de manera que para cada posición anotada, la sonda NivuFlow750 guardará cada 30 segundos valores de caudal (Q), altura relativa (H) y velocidad (V). Para cada posición se ha recogido información durante 20 minutos. Posteriormente los valores correspondientes a una posición en concreto serán el promedio de todos los valores registrados durante ese período.

En total se han estudiado 29 posiciones, con períodos de lectura de medidas de 15, 20 o 30 minutos dependiendo de la posición.



4.1.3 Lecturas

Datos del experimento							NivuFlow750			Datos adicionales (!No hay medios!)						
Fecha	Posición Compuerta de entrada	Posición Compuerta anti-inundación	Posición Compuerta salida	Hora inicial	Hora final	Tiempo	Q	H	V	Nivel del Danubio	Nivel NivuFlow750	Sonda de nivel 1	Sonda de nivel 2	Sonda de nivel 3	Turb. 1	Turb. 2
-	mm	mm	mm	hh:mm	hh:mm	min	m ³ /s	m	m/s	m ü.A.	m ü.A.	m ü.A.	m ü.A.	m ü.A.	FNU	FNU
09/10/15																
1	250	3250	250	11:38	12:08	30	1,21	2,47	0,10	161,478	161,417	161,417	161,415	161,419	33,64	26,4
2	250	3250	500	12:16	12:46	30	2,49	2,11	0,24	161,498	161,047	161,079	161,067	161,085	28,8	27,6
3	250	3250	750	12:53	13:23	30	3,40	1,70	0,40	161,472	160,857	160,658	160,645	160,649	28,5	28,2
4	250	3250	1000	13:28	13:48	20	3,94	1,47	0,54	161,474	160,420	160,431	160,402	160,410	30,9	28,3
5	250	3250	1200	13:58	14:18	20	4,32	1,37	0,63	161,509	160,324	160,335	160,295	160,388	31,7	28,2
6	375	3250	1200	14:25	14:45	20	5,17	1,87	0,55						33,3	30,6
7	375	3250	1000	15:00	15:20	20	4,74	1,98	0,48	161,494	160,932	160,933	160,914	160,925	27,9	28,5
8	375	3250	750	15:28	15:48	20	3,77	2,13	0,35	161,475	161,077	161,086	161,093	161,079	30,4	28,7
9	375	3250	500	15:53	16:13	20	2,79	2,35	0,24	161,495	161,307	161,310	161,305	161,314	29,4	28,7
10	375	3250	250	16:18	16:38	20	1,06	2,50	0,08	161,491	161,463	161,466	161,463	161,472	32,1	27,9
11	500	3250	250	16:43	17:00	17	1,06	2,53	0,08	161,512	161,495	161,503	161,501	161,508	35,1	28,1
12	500	3250	500	17:05	17:25	20	2,68	2,44	0,22	161,491	161,411	161,414	161,410	161,417	28,8	28,1
13	500	3250	750	17:28	17:48	20	4,39	2,31	0,38	161,501	161,259	161,273	161,259	161,265	27,2	28,2



Datos del experimento							NivuFlow750			Datos adicionales (!No hay medios!)						
Fecha	Posición Compuerta de entrada	Posición Compuerta anti-inundación	Posición Compuerta salida	Hora inicial	Hora final	Tiempo	Q	H	V	Nivel del Danubio	Nivel NivuFlow750	Sonda de nivel 1	Sonda de nivel 2	Sonda de nivel 3	Turb. 1	Turb. 2
-	mm	mm	mm	hh:mm	hh:mm	min	m3/s	m	m/s	m ü.A.	m ü.A.	m ü.A.	m ü.A.	m ü.A.	FNU	FNU
12/10/15																
14	500	3250	1000	11:18	11:38	20	4,77	2,13	0,45	161,395	161,085	161,091	161,077	161,085	17,2	13,4
15	500	3250	1500	11:45	12:05	20	5,99	1,99	0,60	161,401	160,951	160,972	160,934	160,947	14,3	13,6
16	750	3250	1500	12:11	12:32	21	6,61	2,22	0,60	161,399	161,170	161,191	161,165	161,178	16,5	13,5
17	750	3250	1200	12:38	12:58	20	6,03	2,27	0,53	161,402	161,223	161,237	161,215	161,226	13,5	12,8
18	750	3250	1000	13:03	13:23	20	5,26	2,31	0,46	161,388	161,261	161,270	161,250	161,255	13,6	12,8
19	750	3250	750	13:28	13:48	20	3,73	2,35	0,32	161,357	161,276	161,287	161,278	161,290	13,6	12,7
20	750	3250	500	13:53	14:13	20	2,44	2,42	0,20	161,381	161,366	161,376	161,374	161,384	13	12,9
21	1000	3250	250	14:18	14:38	20	1,06	2,44	0,09	161,371	161,388	161,389	161,383	161,389	14,4	12,8
22	1000	3250	750	14:42	15:02	20	4,01	2,41	0,33	161,390	161,357	161,355	161,345	161,357	13,1	12,9
23	1000	3250	1000	15:05	15:25	20	5,19	2,36	0,44	161,389	161,302	161,303	161,287	161,308	12,5	13,3
24	1000	3250	1200	15:30	15:50	20	6,38	2,33	0,55	161,337	161,265	161,272	161,251	161,264	13	13,1
13/10/15																
25	1250	3250	1500	10:55	11:15	20	7,11	2,38	0,60	161,411	161,337	161,345	161,318	161,336	17,9	14,3
26	1250	3250	1200	11:20	11:40	20	5,88	2,40	0,49	161,402	161,351	161,356	161,338	161,354	12,2	12,4
27	1250	3250	1000	11:45	12:05	20	5,26	2,40	0,44	161,415	161,378	161,381	161,367	161,382	12,1	12
28	1250	3250	750	12:09	12:29	20	3,91	2,42	0,32	161,406	161,380	161,388	161,386	161,394	12,5	12
29	1500	3250	500	12:39	12:59	20	2,42	2,45	0,20	161,409	161,414	161,415	161,413	161,409	12,6	12,2

Tabla 1. Valores obtenidos para cada posición de las compuertas (12-13/10/15)

4.1.4 Distribución temporal

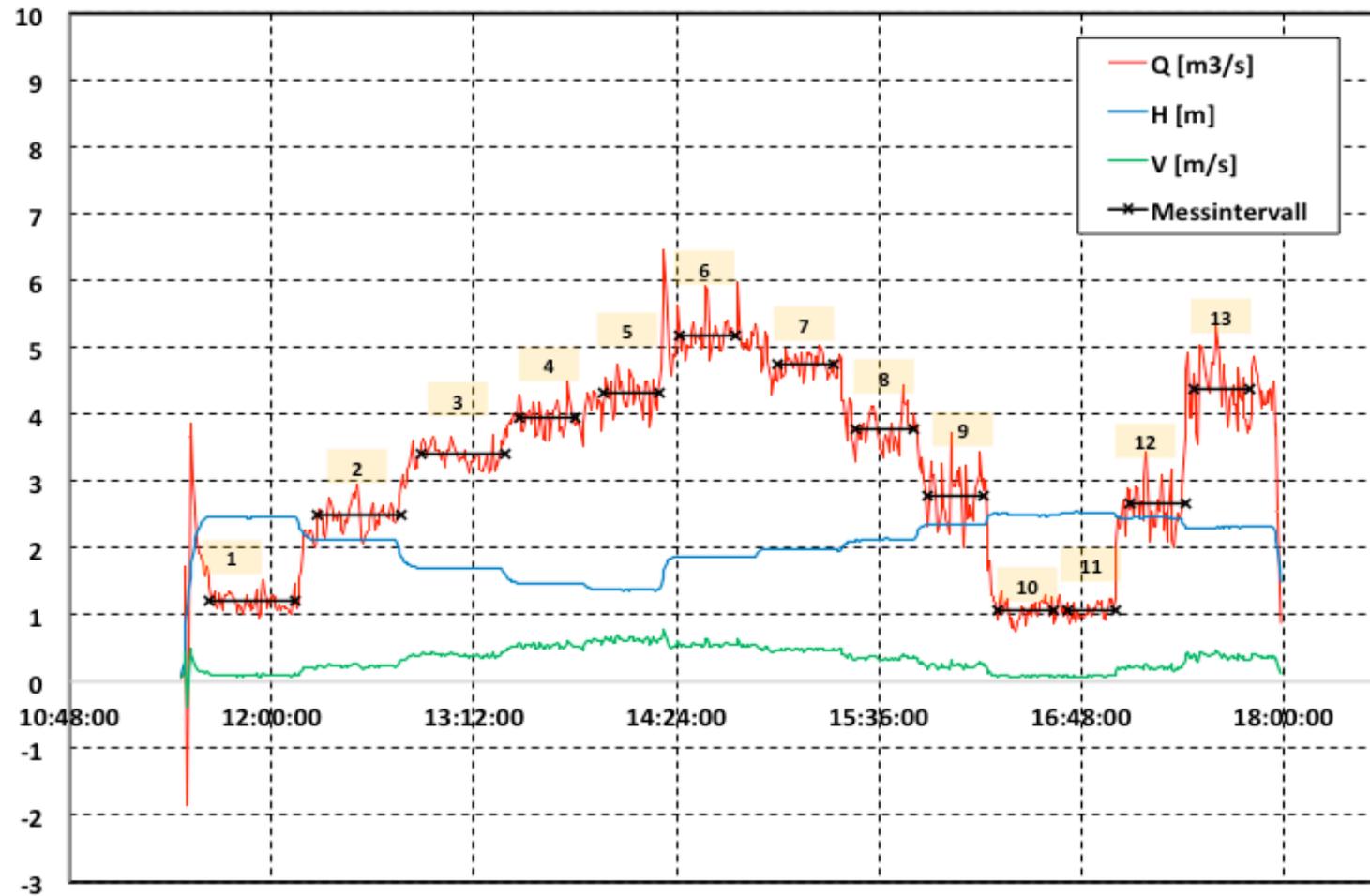


Gráfico 1. Distribución temporal de las posiciones 1 al 13

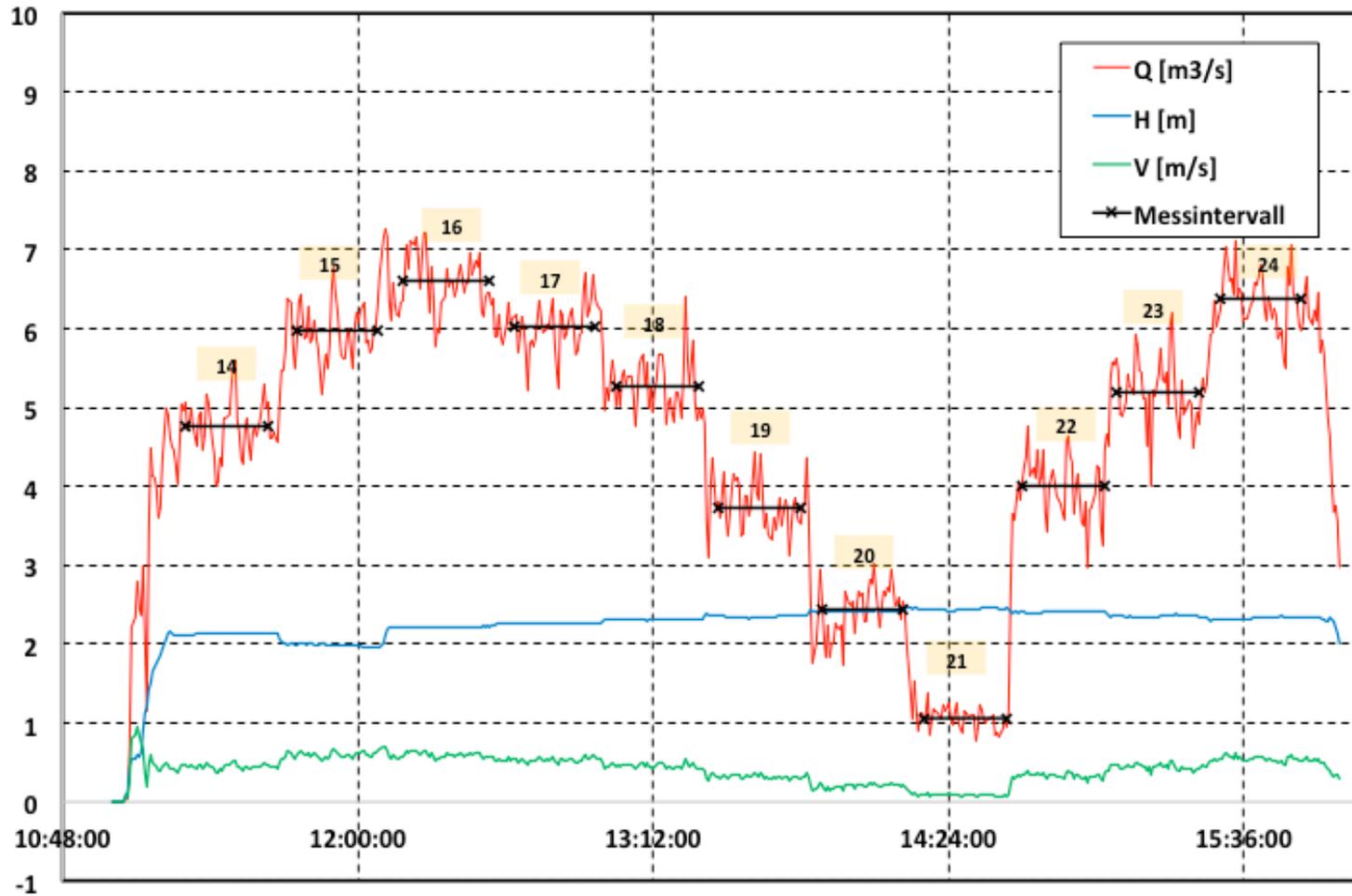


Gráfico 2. Distribución temporal de las posiciones 1 al 13

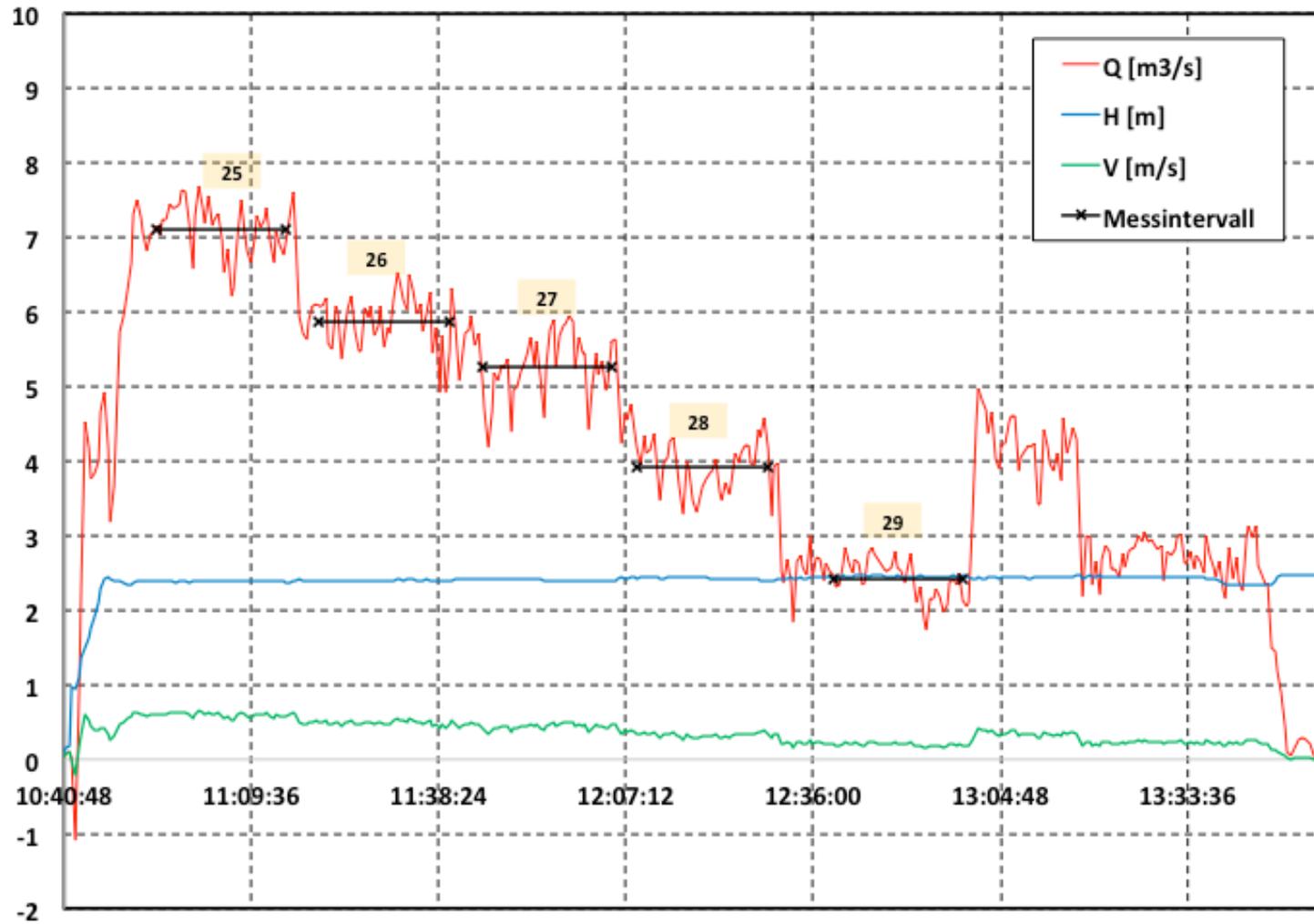


Gráfico 3. Distribución temporal de las posiciones 25 al29

4.1.5 Observaciones

Las gráficas muestran una distribución temporal de los datos obtenidos durante cada posición, para caudal, altura y velocidad, respondiendo de manera lógica a la ecuación del caudal: $Q = A \cdot V$.

Si aumenta la altura, el caudal aumentará a su vez de manera proporcional.

De los valores obtenidos podemos observar entonces que responden de manera acorde a lo esperable considerando la situación de cada compuerta en cada situación. Por lo tanto podemos asegurar que nos encontramos trabajando dentro del rango de operación.

4.1.6 Diagramas de operación

Una vez se han obtenido los valores de cada posición, procedemos a crear un diagrama donde se relacione a las posiciones de las compuertas con la descarga, la altura o la velocidad del flujo en el canal. Para ello empleamos la herramienta Surfer, un software para la creación de isolíneas y el modelado de superficies, cartografía, etc.

Emplearemos, con el software Surfer, la herramienta de interpolación del “Vecino natural” de manera que se construyan líneas de tendencia para valores concretos de velocidad, caudal y altura.

Se crea entonces así un mapa de isolíneas para cada parámetro.

De esta manera podremos realizar una estimación muy aproximada a la realidad cuando necesitemos seleccionar un punto de operación, dependiendo de los valores que queramos conseguir

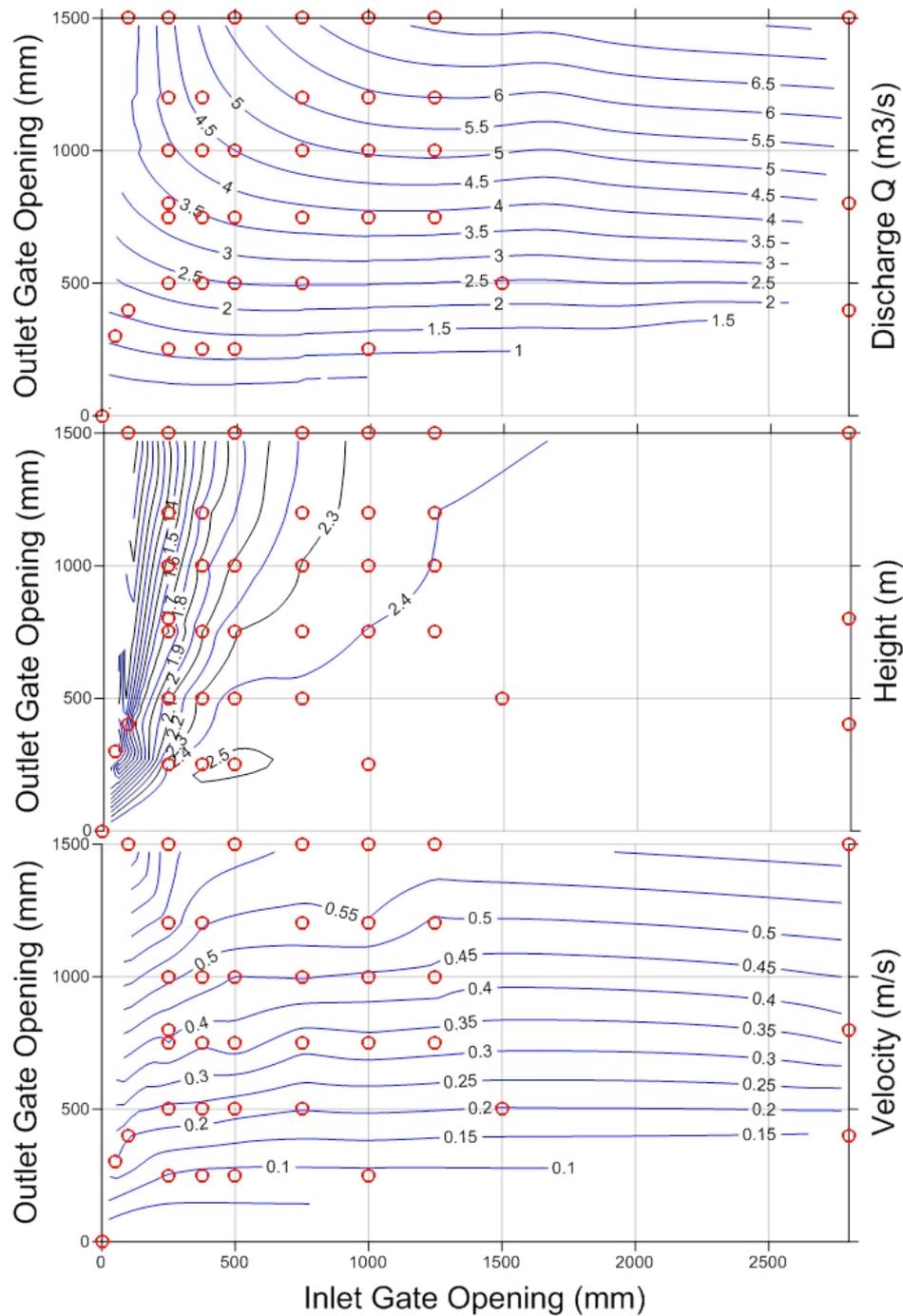


Diagrama 1. Diagramas de operación del canal de investigación

Una alternativa a la herramienta Surfer es el diagrama mostrado a continuación (Diagrama 2). En el presente diagrama es posible conocer el caudal que circulará en el canal para cada posición donde exista una intersección entre sus curvas

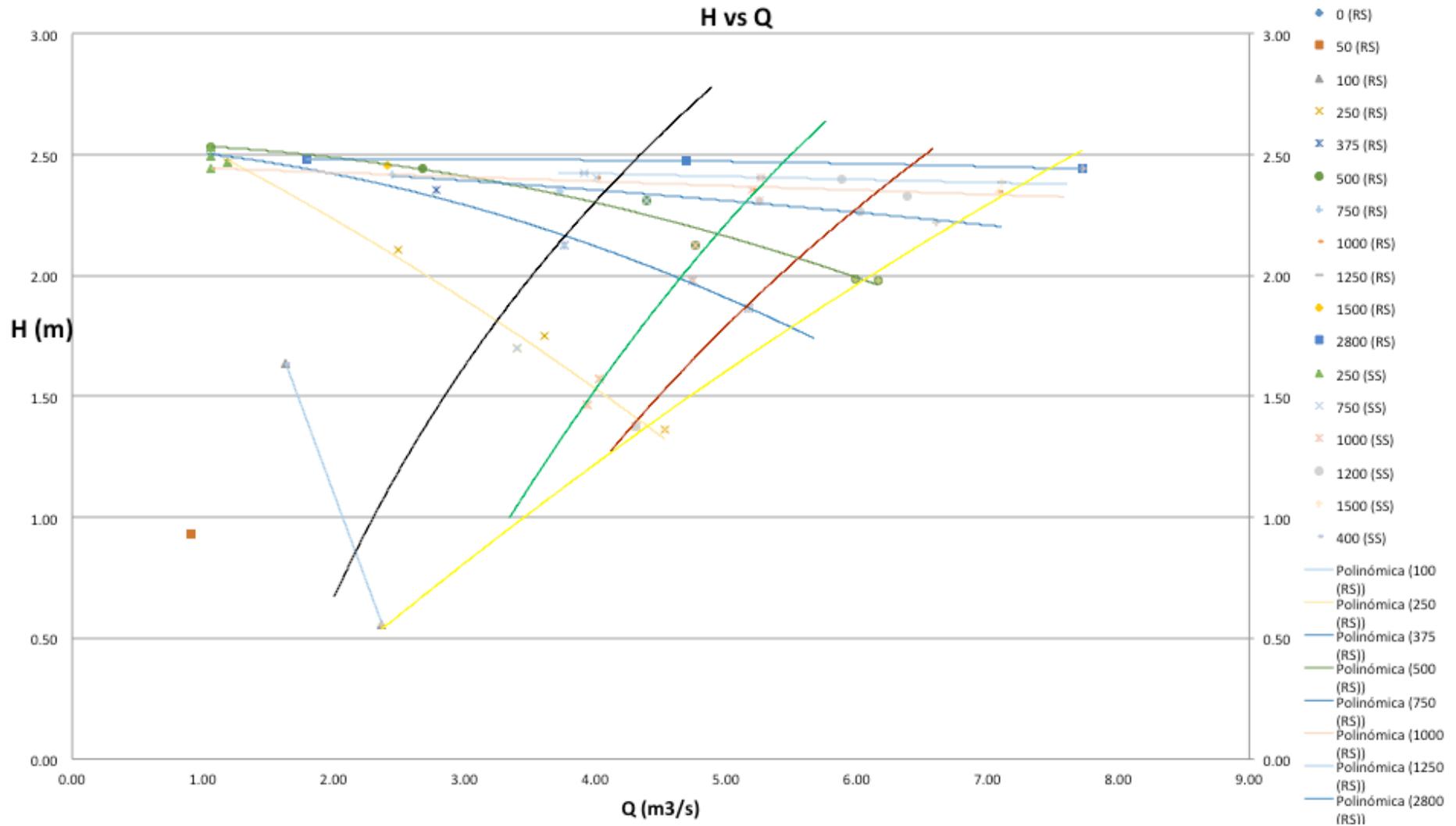


Diagrama 2. Diagrama de operación del canal de investigación

4.2 FASE 2

4.2.1 Selección de los puntos de interés

Debido a las infinitas posibilidades a la hora de realizar mediciones en el Canal de Investigación, con el fin de trabajar siempre en las mismas condiciones de contorno en cuanto a caudal (Q), altura (H), y velocidad (V), se seleccionan 4 puntos de operación obtenidos a partir del diagrama desarrollado en la Fase 1(). De esta manera podemos comprobar cómo afecta el trazado del circuito dependiendo de los distintos elementos que lo componen (cañas, suelo de gravas, plataforma, etc.)

Los puntos de operación seleccionados son los siguientes:

	PO1	PO2	PO3	PO4
H (m)	1	1,75	2,5	2,5
V (m/s)	0,6	0,45	0,3	0,6
Q (m ³ /s)	3	3,9375	3,75	7,5
				Descarga libre

Tabla 2. Puntos de operación

La elección de estos puntos viene dada por la posibilidad de trabajar en distintas situaciones, con regímenes más rápidos (PO1, PO4) o más lentos (PO2, PO3), jugando a su vez con los calados, de manera que nos permita obtener caudales fáciles de alcanzar en la instalación.

4.2.2 Objetivo

En la segunda fase del proyecto se lleva a cabo la obtención de los perfiles de velocidades en las secciones de entrada y de salida de la sección abierta, con el objeto de estudiar cómo afecta al flujo del agua que aparezcan elementos en el canal como la curva antes del tramo abierto o el lecho de grava situado antes de la salida del mencionado tramo., y cómo afecta también que éstos sean retirados.

4.2.3 Procedimiento

Una vez establecidos los puntos de operación se selecciona el equipo a emplear. En este caso, para la segunda fase se han seleccionado las dos sondas SLD de OTT.

La instalación de esta sonda (véase apartado 2.2.5. *Aplicación en campo*) nos permite establecer distintos niveles de medida, por lo que podemos crear un perfil de velocidades a lo largo de la sección transversal del canal. Para ello establecemos unas marcas cada 10 cm en el cable de alimentación y de transmisión de los datos.

Los parámetros de funcionamiento de la sonda se han establecido previamente de la siguiente manera:

- a) Intervalo de medición: 15 segundos
- b) Intervalo medio de medición: 12 segundos
- c) Tamaño de la celda: 50 cm
- d) Distancia muerta: 50 cm
- e) Orilla del canal: izquierda

Realizada la instalación del equipo el canal se operará del mismo que en la Fase 1, mediante el panel de control, estableciendo las posiciones de las compuertas a los niveles que marquen los diagramas para cada uno de los cuatro puntos de operación. Una vez alcanzado el punto de operación deseado se procederá a posicionar la sonda en los distintos niveles que se desee.

Las mediciones de ambas sondas se harán de manera simultánea, pero no siempre a la misma altura. Dependerá de la distribución de los elementos que se encuentren en el canal de investigación.

Se llevan mediciones de los puntos de operación para cada una de las condiciones en las que se encuentra el canal, que se detallarán a continuación.

4.2.4 Condiciones de contorno

1ª Condición de contorno: Con cañas y lecho de grava

La instalación presenta una construcción de madera que sostiene unas cañas flexibles con las que se pretende estudiar si es posible conocer la velocidad del caudal según la posición de éstas. Por otro lado, el lecho de grava permite conocer mejor cómo se desplazan las rocas por la acción del agua en grandes conducciones como ríos o trasvases.

A continuación se muestran unas fotografías del canal en estas condiciones:



Imagen 16. Vista desde sección entrada



Imagen 17 Vista desde sección salida

En esta situación, para la sonda COM11 es necesario tener en consideración el lecho de grava, ya que no podrá realizar mediciones a alturas cercanas al suelo.

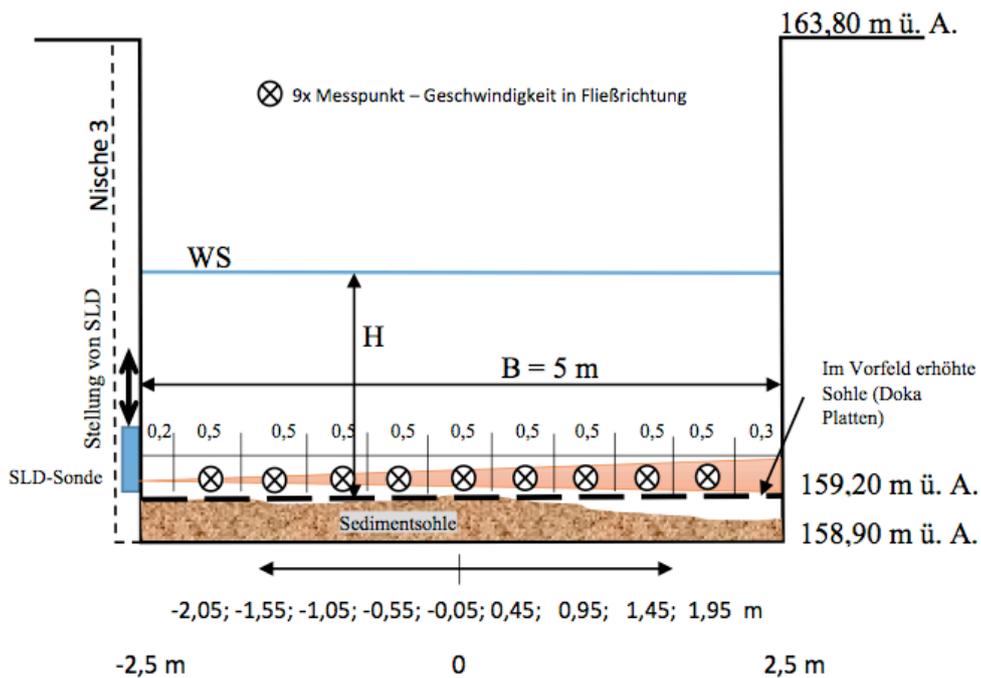


Ilustración 6. Sección transversal con lecho de piedra

2ª Condición de contorno: Sin cañas y lecho de grava

Las cañas han sido cortadas (se podan de cara al invierno) por lo que sólo se encuentra la base de éstas y el lecho de grava.



Imagen 18. Canal sin cañas y lecho de grava



Imagen 19. Llenado de canal sin cañas

3ª Condición de contorno: Canal vacío

Se desmonta las bases de madera que conforman las sujeciones de las cañas y del lecho de grava, que es extraído también en su totalidad.



Imagen 18. Canal vacío drenando agua



Imagen 19. Fotografía del Canal vacío

4.2.5 Obtención de las descargas por el método Velocidad-Área.

El método velocidad-área a implementar depende de la medición de la velocidad media de la corriente y del área de la sección transversal del canal, calculándose a partir de la fórmula de la continuidad:

$$Q = \int \int_A V \cdot dA$$

Las mediciones representan valores promedio a lo largo de un ancho del cauce, para cada posición D_i medida tendremos su velocidad promedio e la sección transversal.

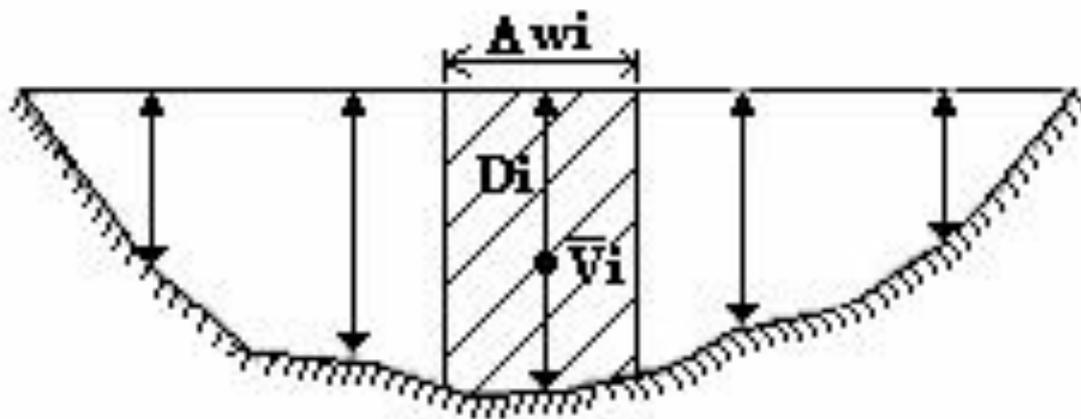


Ilustración 7. Disposición del método área-velocidad en una sección transversal

El caudal queda entonces como el sumatorio del producto de cada uno de los elementos medidos a lo largo de una altura y dentro de una sección definida, quedando la fórmula.

$$Q = \sum_{i=1}^n V_i D_i \Delta w_i$$

Podemos proceder a aplicar éste método a continuación, con las siguientes condiciones de medición:

a) 1ª Condición de contorno: Con cañas y lecho de grava y PO2

Condiciones de operación	
H (m)	1,75
V (m/s)	0,45
Q (m ³ /s)	3,9375

Tabla 3. Condiciones de operación OP2

La tabla a continuación recoge los valores medio de velocidades en la sección transversal del canal, en dirección del flujo, el ancho del tramo medido, marcado por el ancho de la celda de medida (0,5 m) común para todos, y el valor resultante de la operación con un sumatorio total de todos los caudales medios distribuidas en al sección.

	Altura (m)		Velocidad media		Ancho (m)	Caudal medio	
	A	B	A (X)	B (X)		(m ³ /s)	(m ³ /s)
1	1,43	1,63	0,575	0,538	0,5	0,411	0,439
2	1,23	1,43	0,554	0,530	0,5	0,341	0,379
3	1,03	1,33	0,616	0,589	0,5	0,317	0,392
4	0,83	1,13	0,574	0,549	0,5	0,238	0,310
5	0,73	0,93	0,573	0,536	0,5	0,209	0,249
6	0,63	0,83	0,576	0,527	0,5	0,181	0,219
7	0,53	0,73	0,568	0,526	0,5	0,150	0,192
8	0,43	0,68	0,566	0,514	0,5	0,122	0,175
9	0,33	0,63	0,567	0,516	0,5	0,094	0,162
10	0,28	0,58	0,554	0,493	0,5	0,078	0,143
11	0,23	0,53	0,553	0,479	0,5	0,064	0,127
12	0,18	0,48	0,543	0,456	0,5	0,049	0,109
13	0,13	0,43	0,533	0,399	0,5	0,035	0,086
14	0,08	0,38	0,599	0,435	0,5	0,024	0,083
15	0,03	0,33	0,591	0,334	0,5	0,009	0,055
					Qtotal	2,321	3,120

Tabla 4. Obtención del caudal mediante el método Velocidad-área

Podemos observar que el caudal obtenido no se encuentra próximo al estimado con anterioridad con el dispositivo NivuFlow750 (Tabla 3). Esto puede deberse a un error en la calibración de la sonda.

El perfil de velocidades es el siguiente:

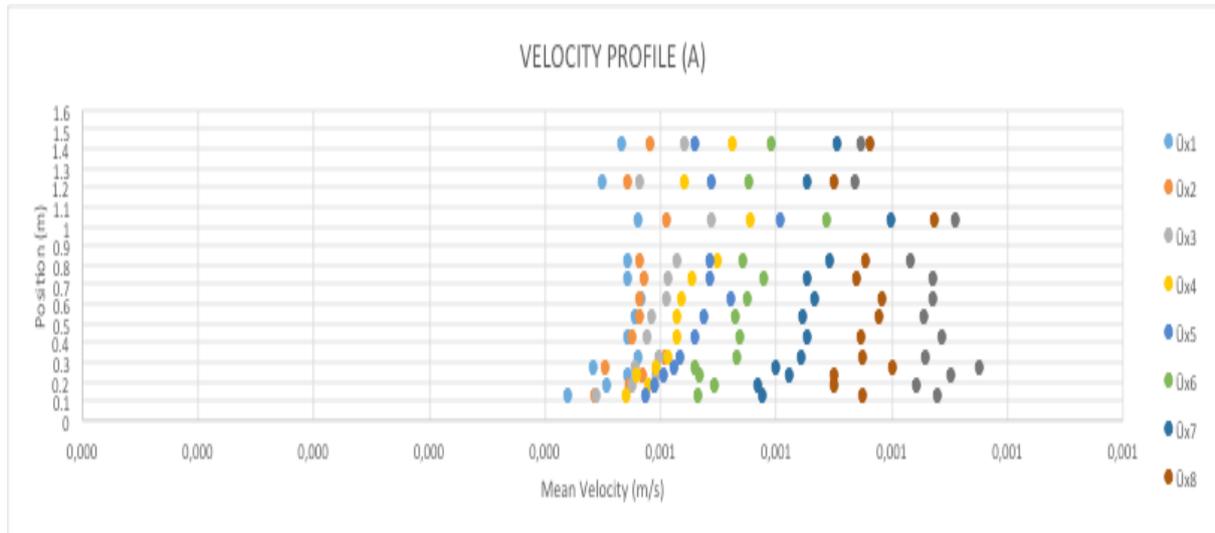


Gráfico 4. Perfil de velocidades PO2, Con cañas. Sección A

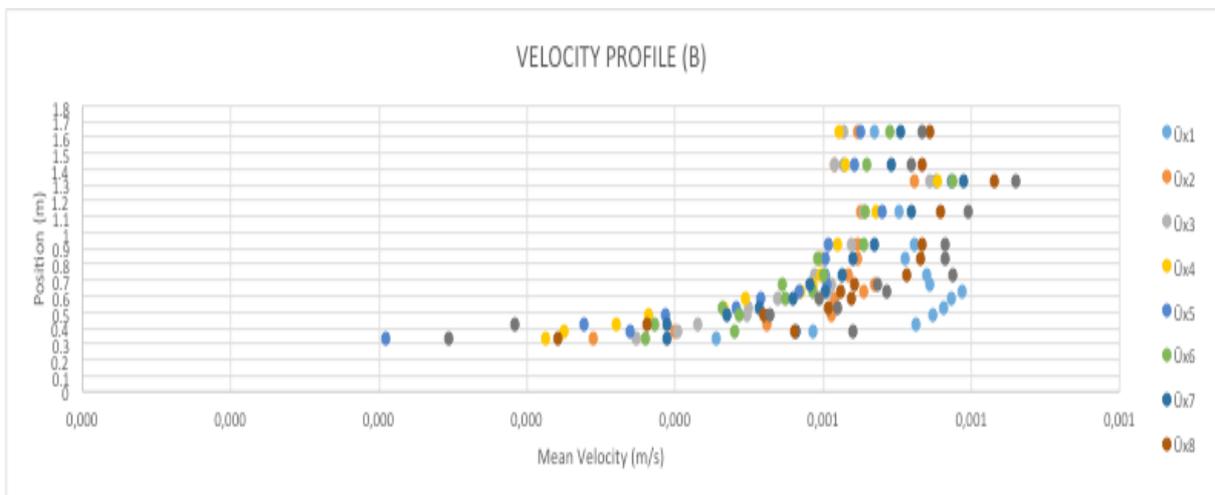


Gráfico 5. Perfil de velocidades PO2, Cin cañas. Sección B

b) 2ª Condición de contorno: Sin cañas y lecho de grava y PO2

Condiciones de operación	
H (m)	1,75
V (m/s)	0,45
Q (m3/s)	3,9375

Tabla 5. Condiciones de operación OP2

Repetimos el proceso, en una tabla a continuación se recogen los valores medios de velocidad en la sección transversal del canal, en dirección del flujo, el ancho sigue

siendo común para todos (0,5 m), y el valor resultante de la operación con un sumatorio total de todos los caudales medios distribuidas en al sección.

	Altura (m)		Velocidad media		Ancho (m)	Caudal medio	
	A	B	A (X)	B (X)		(m3/s)	(m3/s)
1	1,43	1,63	0,665	0,668	0,5	0,476	0,544
2	1,23	1,43	0,658	0,669	0,5	0,405	0,478
3	1,03	1,33	0,665	0,666	0,5	0,343	0,443
4	0,83	1,13	0,639	0,661	0,5	0,265	0,373
5	0,73	0,93	0,061	0,647	0,5	0,022	0,301
6	0,63	0,83	0,631	0,643	0,5	0,199	0,267
7	0,53	0,73	0,625	0,644	0,5	0,166	0,235
8	0,43	0,68	0,603	0,629	0,5	0,130	0,214
9	0,33	0,63	0,580	0,631	0,5	0,096	0,199
10	0,28	0,58	0,571	0,631	0,5	0,080	0,183
11	0,23	0,53	0,547	0,615	0,5	0,063	0,163
12	0,18	0,48	0,515	0,609	0,5	0,046	0,146
13	0,13	0,43	0,484	0,603	0,5	0,031	0,130
14	0,08	0,38	0,444	0,601	0,5	0,018	0,114
15	0,03	0,33	0,372	0,578	0,5	0,006	0,095
					Qttotal =	2,344	3,885

Tabla 6. Obtención del caudal mediante el método Velocidad-área

Se observa una mayor proximidad entre el valor del caudal estimado y el obtenido en la sección B, por encima del lecho de piedras.

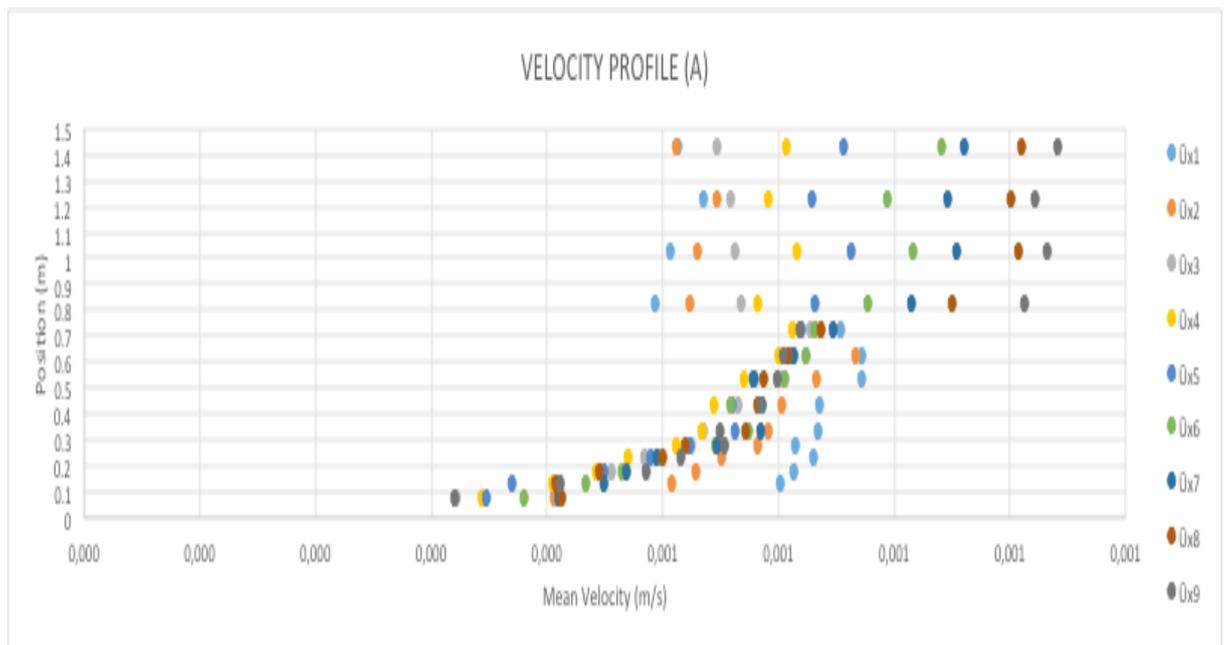


Gráfico 6. Perfil de velocidades PO2. Sin cañas. Sección A

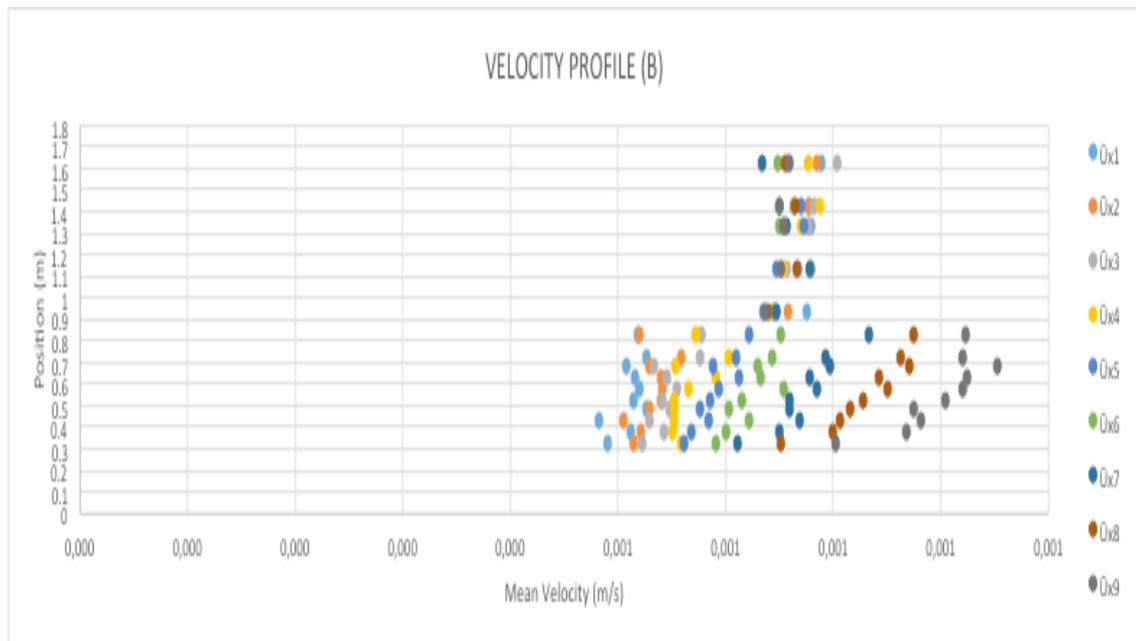


Gráfico 7. Perfil de velocidades PO2. Sin cañas. Sección B

c) 3ª Condición de contorno: Canal vacío y PO2

Condiciones de operación	
H (m)	1,75
V (m/s)	0,45
Q (m ³ /s)	3,9375

Tabla 7. Condiciones de operación OP2

	Altura (m)		Velocidad media (m/s)		Ancho (m)	Caudal medio (m3/s)	
	A	B	A (X)	B (X)		A (X)	B (X)
1	1,38	1,53	0,693	0,518	0,5	0,478	0,396
2	1,18	1,33	0,673	0,513	0,5	0,397	0,341
3	0,98	1,23	0,660	0,524	0,5	0,323	0,322
4	0,78	1,03	0,664	0,523	0,5	0,259	0,269
5	0,68	0,83	0,649	0,513	0,5	0,221	0,213
6	0,58	0,73	0,647	0,515	0,5	0,188	0,188
7	0,48	0,63	0,645	0,509	0,5	0,155	0,160
8	0,38	0,58	0,640	0,512	0,5	0,122	0,148
9	0,28	0,53	0,634	0,506	0,5	0,089	0,134
10	0,23	0,48	0,627	0,504	0,5	0,072	0,121
11	0,18	0,43	0,642	0,511	0,5	0,058	0,110
12	0,13	0,38	0,635	0,499	0,5	0,041	0,095
13	0,08	0,33	0,618	0,498	0,5	0,025	0,082
14	0,03	0,28	0,622	0,508	0,5	0,009	0,071
15	0,08	0,23	0,575	0,482	0,5	0,023	0,055
		0,180		0,493	0,5		0,044
		0,630		0,482	0,5		0,152
		0,130		0,476	0,5		0,031
		0,030		0,465	0,5		0,007
				Q tot=		2,459	2,707

Una vez más, los caudales distan mucho de aproximarse al valor indicado por el dispositivo NivuFlow. Esto puede deberse a un cambio en las condiciones de operación del canal durante las mediciones, o un mal funcionamiento de uno de los dos dispositivos.

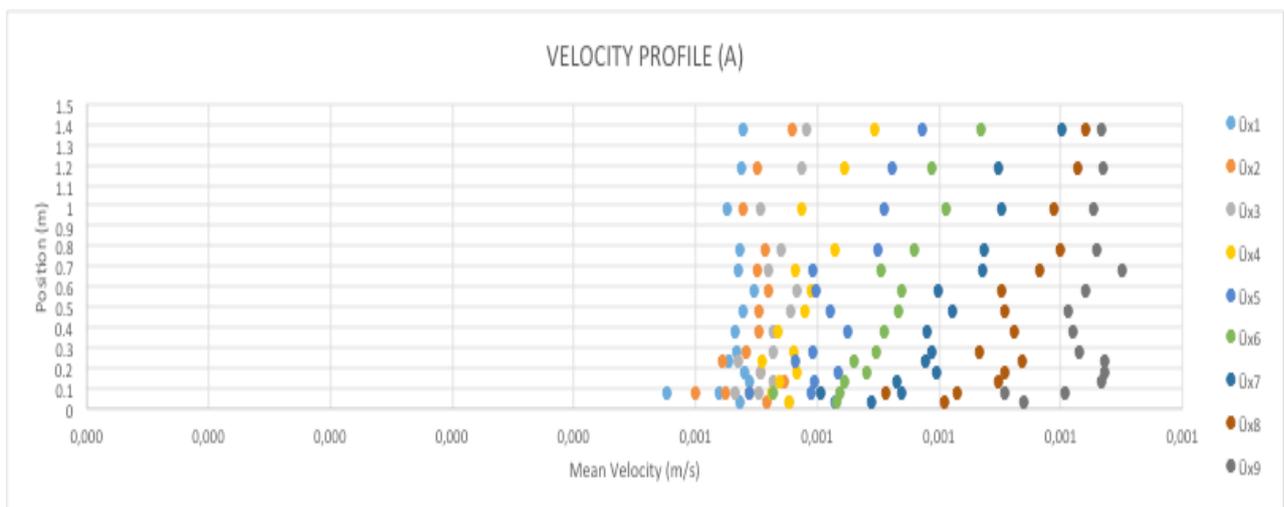


Gráfico 8. Perfil de velocidades PO2. Canal vacío. Sección A

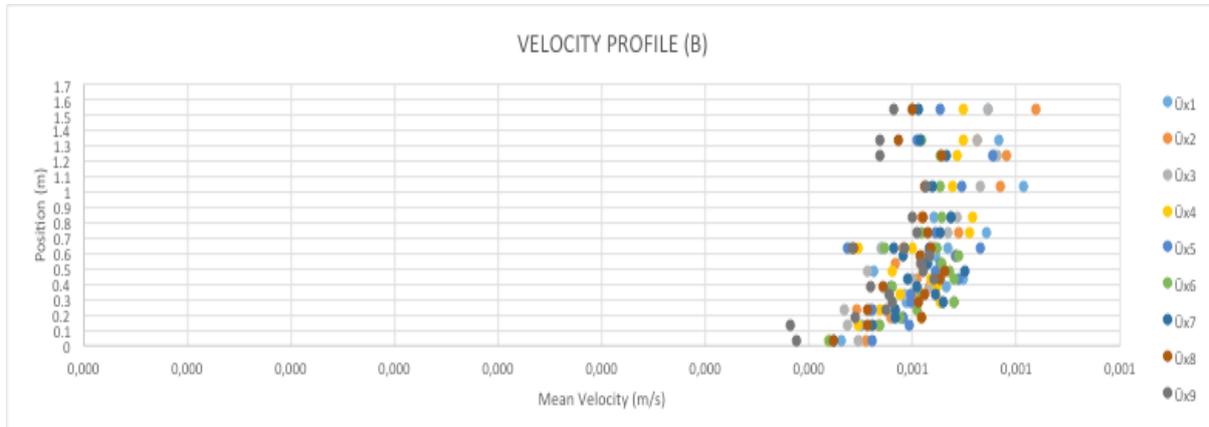


Gráfico 9. Perfil de velocidades PO2. Canal vacío. Sección B

4.2.6 Estudio de las turbulencias en el canal

La presencia de las turbulencias supone una desviación del flujo principal, apareciendo valores en las componentes transversal de las velocidades.

Para poder observar de manera gráfica la distribución de esas componentes transversales nos ayudaremos una vez de la herramienta Surfer, creando “mapas” de líneas interpoladas en función de las medidas tomadas para cada punto de operación y cada condición de contorno.

Así pues se muestra a continuación una selección de perfiles creados a través de los valores de la componente “y” de la velocidad. Se elegirán el mismo punto de funcionamiento y la misma sonda, de manera que se pueda estudiar también las diferencias entre ellas debidas a cambios en su entorno. El resto de perfiles se incluirán en los anexos.

A. El primer perfil se ha obtenido con la sonda B (COM11)

1. Condición de Contorno 1 (con cañas y lecho) y Punto de Operación 2 ($H=1,75\text{m}$, $Q = 3,93 \text{ m}^3/\text{s}$, $V = 0,4 \text{ m/s}$) y sonda COM11 (sobre lecho de piedras)

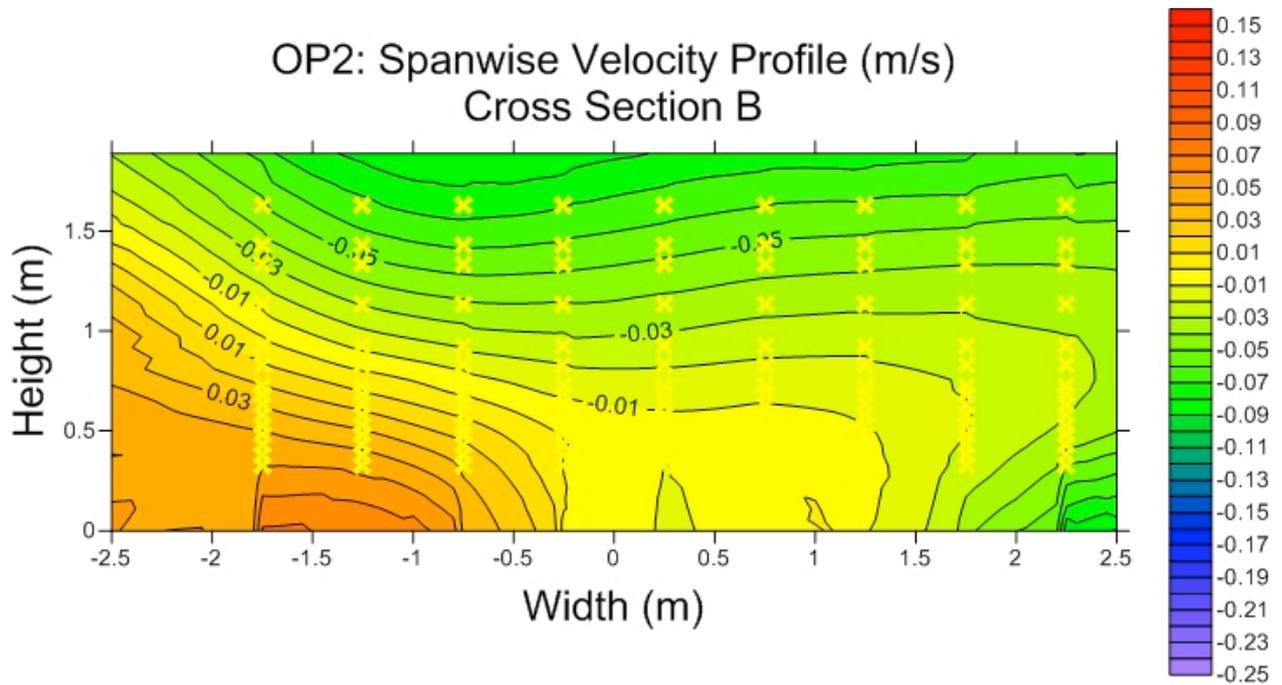


Gráfico 1. Distribución de la componente transversal del flujo en la sección

2. Condición de Contorno 2 (sin cañas y con lecho) y Punto de Operación 2 ($H=1,75\text{m}$, $Q = 3,93 \text{ m}^3/\text{s}$, $V = 0,4 \text{ m/s}$) y sonda COM11 (sobre lecho de piedras)

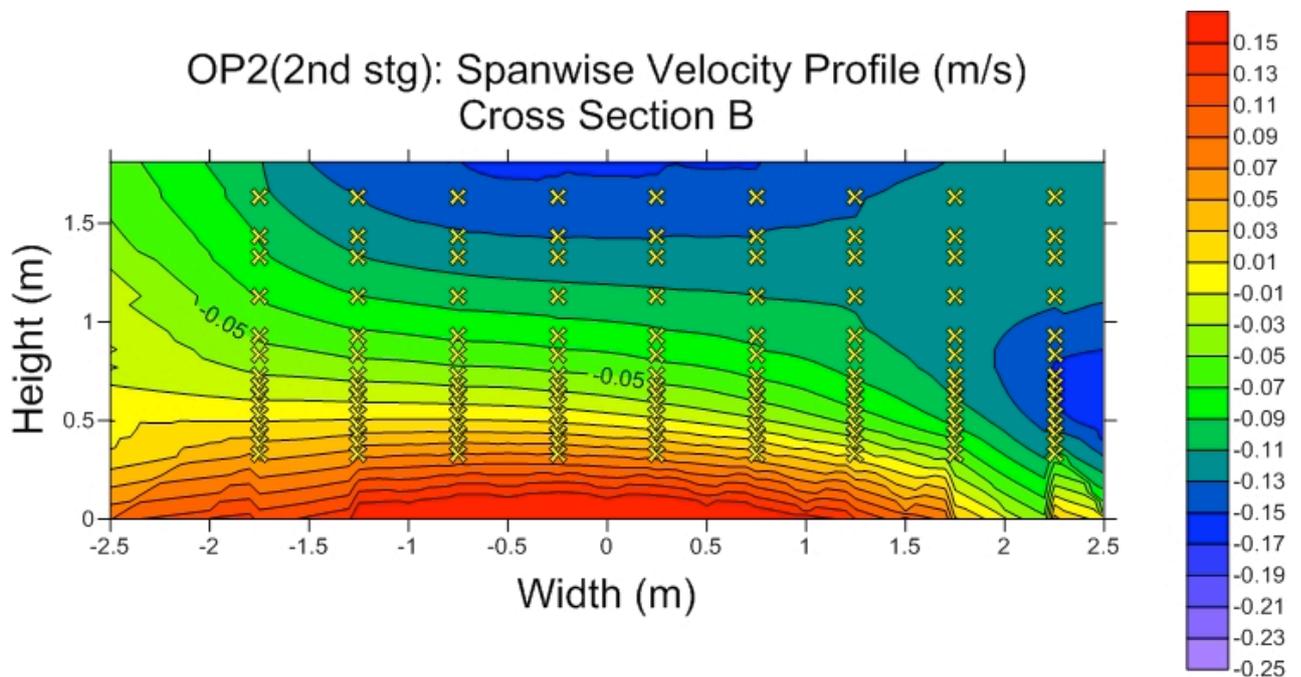


Gráfico 2. Distribución componente transversal del velocidad

3. Condición de Contorno 3 (canal vacío) y Punto de Operación 2 ($H=1,75\text{m}$, $Q = 3,93 \text{ m}^3/\text{s}$, $V = 0,4 \text{ m/s}$) y sonda COM11 (sobre lecho de piedras)

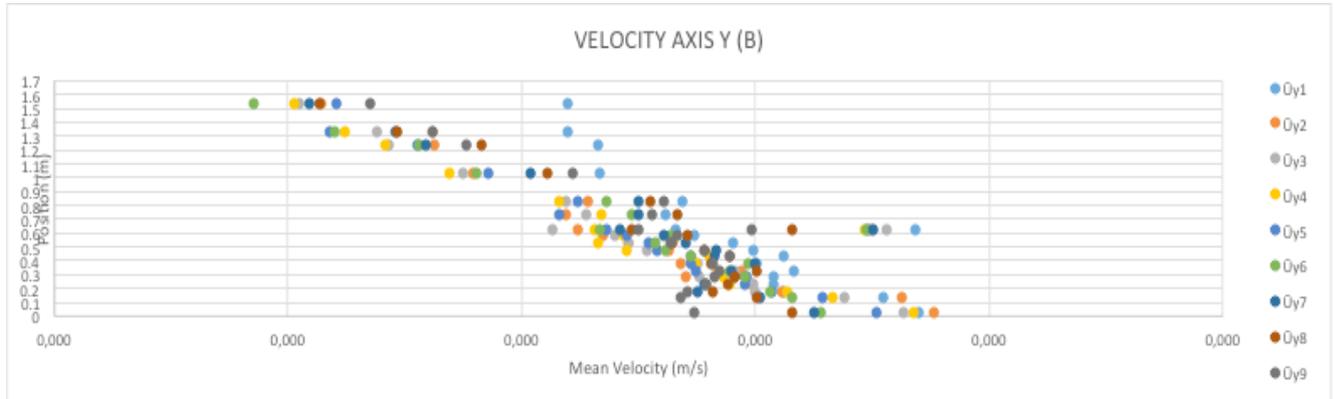


Gráfico 10. Distribución de la componente transversal de la velocidad

Una vez tenemos todas las gráficas podemos observar que las velocidades fluctúan muy poco, aproximándose a valores prácticamente nulos para la situación del canal vacío (Gráfico 1) y siendo prácticamente igual en el caso de las cañas (Gráfico 2) y en de sin cañas. Por lo tanto podemos deducir que la presencia de las cañas no supone una pequeña distorsión en el flujo principal del agua, probablemente debido a una estabilización del fluido entre las cañas y el lecho de piedras.

- B. El segundo perfil se ha obtenido con la sonda A (COM8)

1. Condición de Contorno 1 (con cañas y lecho) y Punto de Operación 2 ($H=1,75\text{m}$, $Q = 3,93 \text{ m}^3/\text{s}$, $V = 0,4 \text{ m/s}$) y sonda COM8 (tras curva)

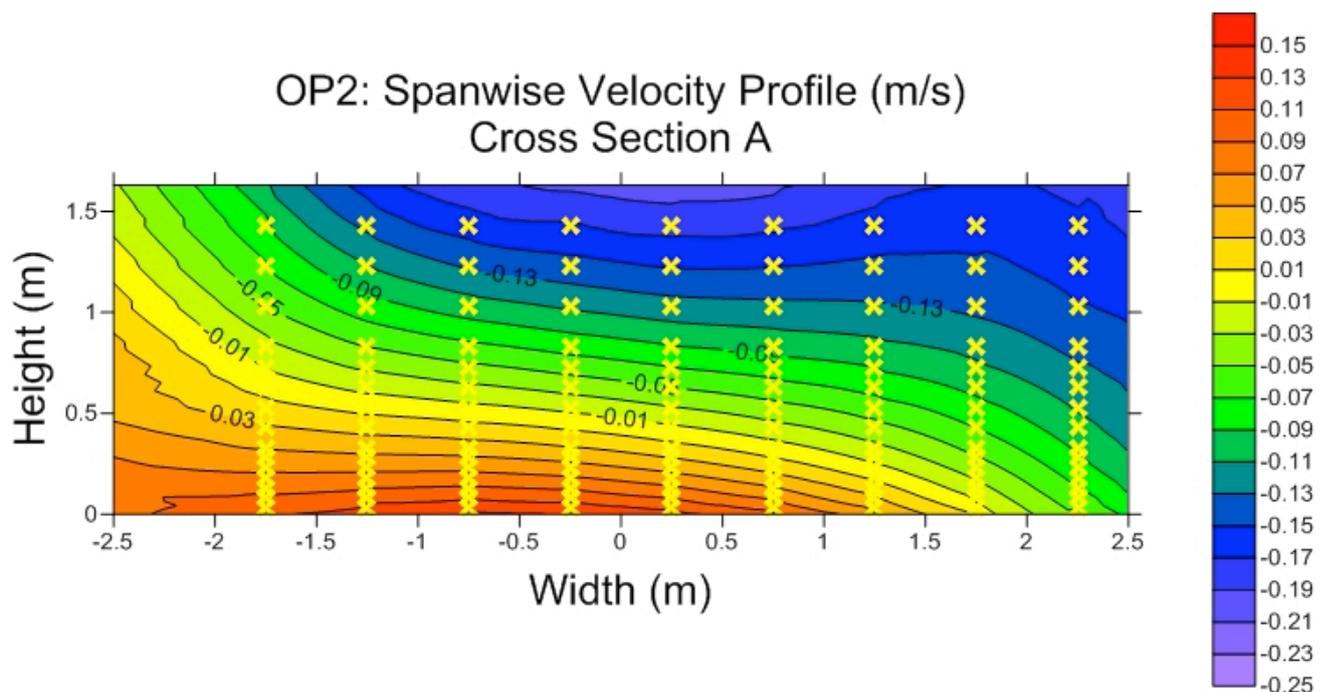


Gráfico 11. Distribución de la componente transversal del flujo en la sección

2. Condición de Contorno 2 (sin cañas y con lecho) y Punto de Operación 2 (H=1,75m, Q = 3,93 m³/s, V = 0,4 m/s) y sonda COM8 (tras curva)

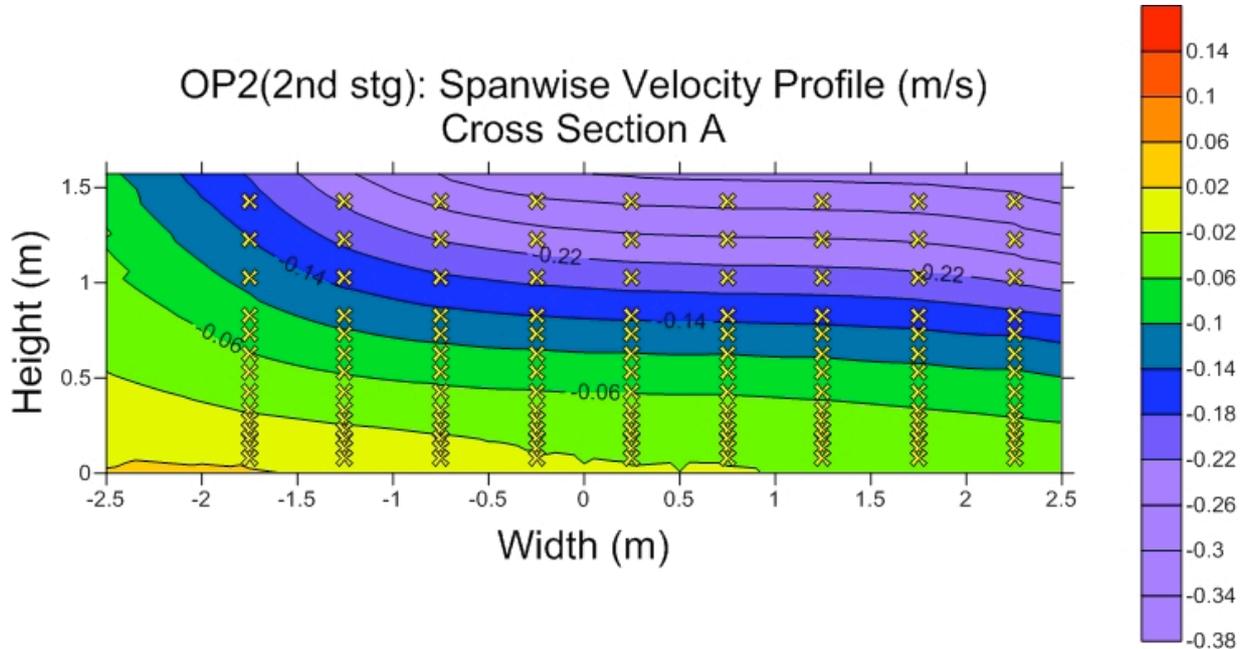


Gráfico 12. Distribución de la componente transversal del flujo en la sección

3. Condición de Contorno 3 (canal vacío) y Punto de Operación 2 (H=1,75m, Q = 3,93 m³/s, V = 0,4 m/s) y sonda COM8 (tras curva)

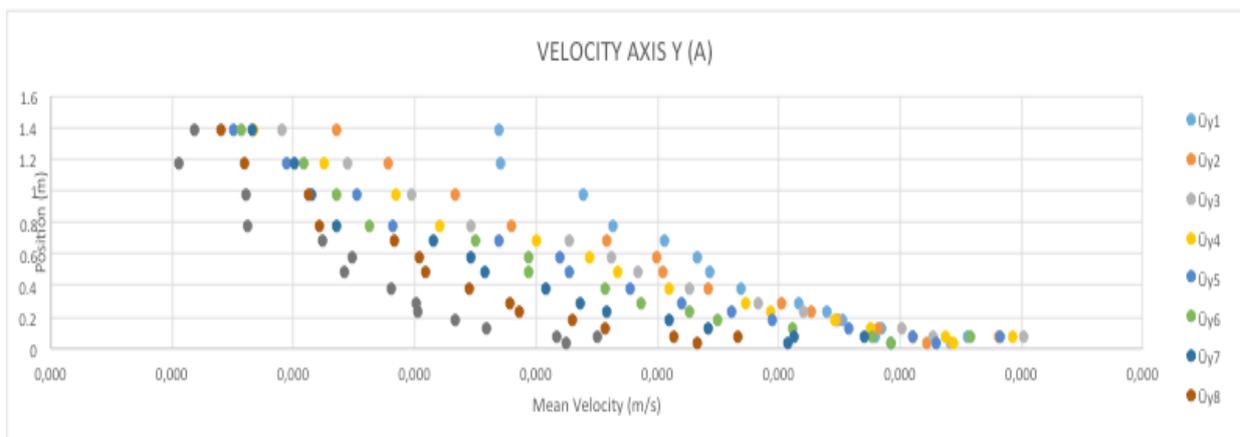


Gráfico 13. Distribución de la componente transversal del flujo en la sección

En esta ocasión los valores son similares en los tres gráficos, con velocidades transversales mucho mayores a las alcanzadas en el mismo punto de operación y con

las mismas condiciones de contorno, que en la sección B. Esto quiere decir que el principal causante de la aparición de turbulencias es la curva del trazado, generando una desviación clara hacia la margen izquierda del canal (localización de la sonda). De esta manera detectamos el flujo secundario del caudal.

4.2.7 Perfiles de velocidades en sección transversal según sentido del flujo

A continuación se muestra la distribución natural de la velocidad en una sección transversal para distintos puntos de operación y condiciones de contorno.

- Punto de Operación 4 (descarga libre) con canal vacío:

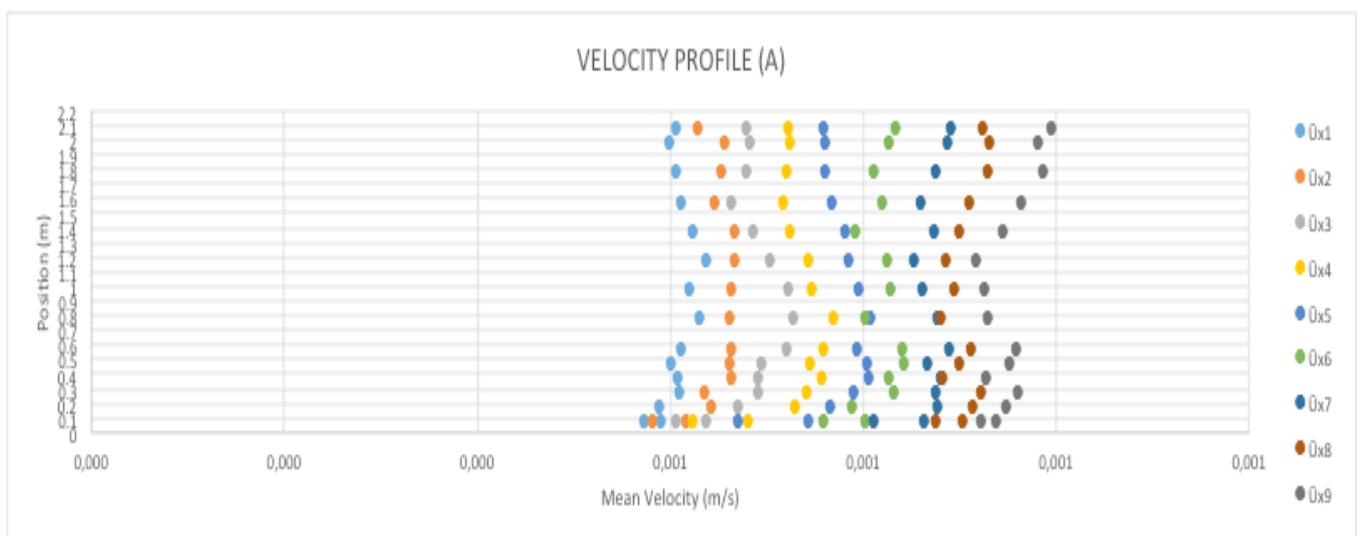


Gráfico 14. Perfil de velocidad para OP4, canal vacío

Se observan velocidades lentas debida a ser una situación con un gran caudal pero una gran altura también.

- Punto de Operación 4 (descarga libre) con canal vacío:

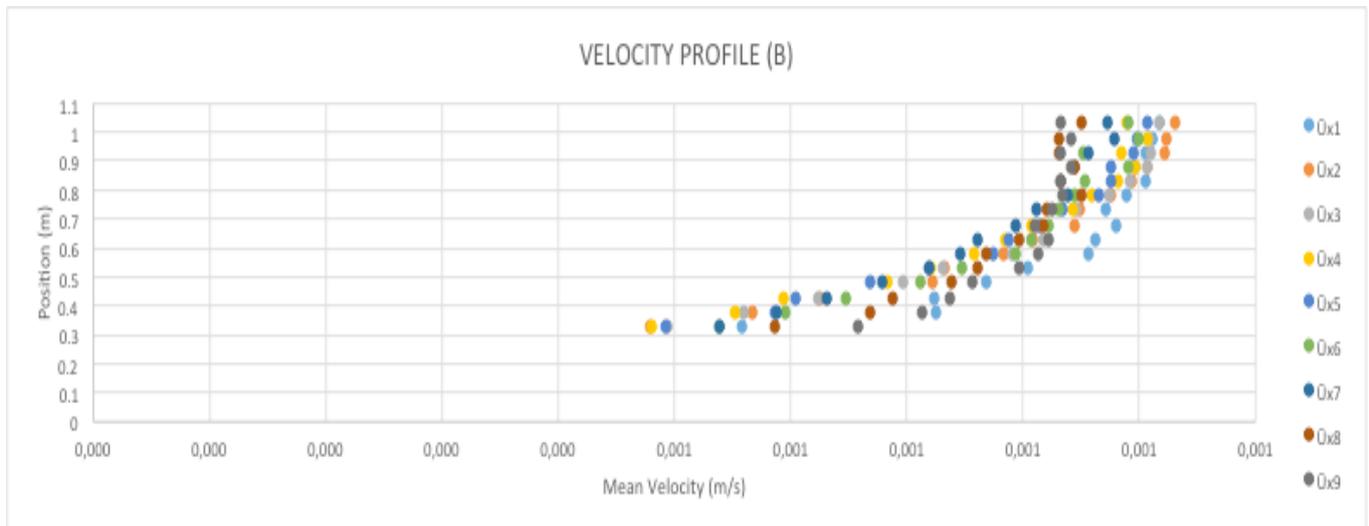


Gráfico 15. Perfil de velocidades PO1, Sin cañas

Se aprecia una distribución perfecta de la velocidad, con las componentes pegados a la superficie más rápidas que las componentes medidas a mayor profundidad

- Punto de Operación 3 (máxima altura) con cañas y lecho:

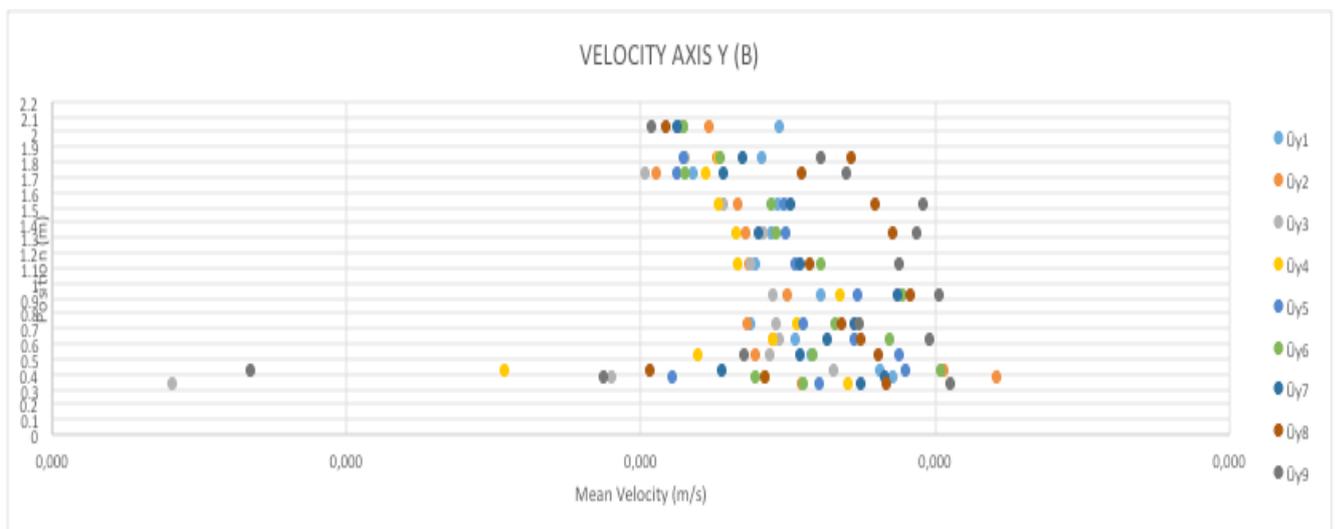


Gráfico 16. Perfil de velocidades difuso

La distribución no es natural, debido probablemente a un fallo de precisión en la medición ocasionado por la poca profundidad de la muestra.

- Punto de Operación 4 (descarga libre) con cañas y lecho:

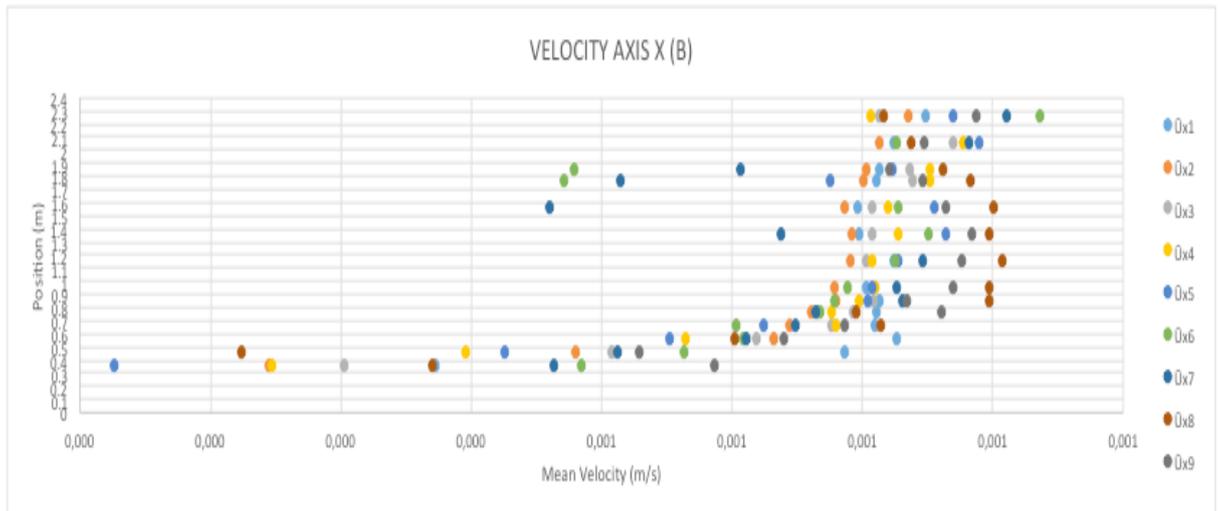


Gráfico 17. Perfil de velocidades difuso

Se aprecia el mismo fallo que el punto anterior, seguramente debido a la proximidad al lecho de grava.

5 Conclusiones

Las conclusiones alcanzadas durante la realización de este proyecto son las expuestas a continuación:

- Existe una relación directa entre la velocidad media y la máxima en cada medición, por lo que el método de ultrasonidos demuestra precisión en la medida.
- Los dispositivos ultrasónicos presentan grandes ventajas frente a otros dispositivos de medición debido a su condición de no intrusión. De esta manera se consiguen unas vidas útiles altas y un ahorro en mantenimiento.
- También presentan desventajas económicas. No son necesarios si la medición no requiere una alta precisión.
- El método Velocidad- Área (Norma DIN EN ISO 478) presenta ventajas a la hora de obtener el valor del caudal de una manera sencilla, sin embargo la incertidumbre en su cálculo es elevada debido a la dependencia de muchos valores fluctuantes durante la obtención de las velocidades promedio empleado en su aplicación.

6 Trabajos Futuros

Se proponen los siguientes trabajos futuros con la finalidad de continuar y mejorar el trabajo expuesto en este documento:

- Implementación de un modelo numérico a partir de los datos recopilados con los dispositivos de medición por ultrasonidos, sabiendo la forma y las dimensiones del canal, de manera que sea posible realizar simulaciones computacionales. Se propone en programa ANSYS para la realización de este apartado.
- Continuación de la recopilación de datos relativos al canal de investigación, de manera que puedan ser parte de una base de datos actualizada, donde se puedan comparar las mediciones realizadas y estimar un modelo de calibración más fiable.
- Realización de mediciones con nuevos elementos en el canal que permitan crear una variación en el flujo, de manera que se pueda ampliar el estudio de las turbulencias en la descarga.
- Utilización de nuevos caudalímetros acústicos, buscando comprobar la eficacia de otra instrumentación cuyo principio de funcionamiento se base en el empleado durante este proyecto. Una propuesta sería la sonda *FlowSens* de SEBA Hydrometrie.

7 Bibliografía

7.1 Referencias literarias

- ✓ J. Le Coz, G. Pierrefeu, and A. Paquier (2008) ***“Evaluation of river discharges monitored by a fixed side-looking Doppler profiler”***
- ✓ Thomas H. Yorke, Kevin A. Oberg (2002). ***“Measuring river velocity and discharge with acoustic Doppler profilers”***
- ✓ Hossein Bonakdari Ali Akbar Zinatizadeh (2011) ***“Influence of position and type of Doppler flow meters on flow-rate measurement in sewers using computational fluid dynamic”***
- ✓ Thomas H. Yorke, Kevin A. Oberg(2002)***“Measuring river velocity and discharge with acoustic Doppler profilers”***
- ✓ John E. Costa, Kurt R. Spicer, Ralph T. Cheng, F. Peter Haeni, Nick B. Melcher, E. Michael Thurman (United States Geological Survey) William J. Plant, William C. Keller (Applied Physics Laboratory, University of Washington). ***“Measuring stream discharge by non-contact methods: A proof-of-concept experiment”***
- ✓ Janice M. Fulford. ***“Discharge Uncertainty Example: Wading Measurements of Discharge Using a Point Velocity Meter and the Velocity-Area Method”***
- ✓ J. Le Coz, B. Camenen, X. Peyrard, G. Dramais ***“Uncertainty in open-channel discharges measured with the velocity–area method”***

7.2 Referencias en internet

- ✓ Carlos Lana Linati (Lana Sarrate) ***“INSTRUMENTACIÓN PARA LA MEDICIÓN DEL CAUDAL”***.Ruta: http://www.lanasarrate.es/files/20101218192606_0427_4fccd2e2-13a3-443a-a117-c5febc15594e.pdf



7.3 Manuales

- ✓ NIVUS “**Instruction Manual, Flow Measurement Transmitter- NivuFlow 750**”
https://www.nivus.com/fileadmin/user_upload/Produkte/Durchflussmessung/Verschmutzte-Medien/NivuFlow-750/NF750_manual-00-en.pdf
- ✓ OTT “**Instrucciones abreviadas- Side Looking Doppler OTT SLD**”
<http://www.ott.com/download/brief-instructions-side-looking-doppler-ott-sld/>
- ✓ SonTek “**FlowTracker- Handheld ADV- Technical Manual- Firmware Version 3.3- Software Version 2.20**”