



Universidad de Valladolid
Campus de Palencia

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍAS AGRARIAS**

Máster en Ingeniería de Montes

ANÁLISIS COMPARATIVO HIDROTOPOGRÁFICO EN
RÍOS MEDIANTE TÉCNICA MANUAL Y TELEMÉTRICAS

Alumno: Rodrigo Cabezudo Tejeda

Tutor: Juan Manuel Diez Hernández

Cotutor: Salvador Hernández Navarro

Julio del 2.017



Copia para el tutor

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción	3
2. Antecedentes	4
2.1. Hidrometría	4
2.1.1. Definición	4
2.1.2. Los métodos tradicionales de aforo en conducciones abiertas	4
2.1.2.1. Método volumétrico	4
2.1.2.2. Método por dilución	4
2.1.2.3. Estructura hidráulica	5
2.1.2.4. Molinete hidráulico	5
2.1.2.5. Método ultrasónico	9
2.1.2.6. Método electromagnético	9
2.1.2.7. Método del flotador	11
2.1.3. Estaciones de aforo clásicas y la curva de gasto	11
2.1.3.1. Clasificación de las curvas de gasto	11
2.2. Limitaciones de los métodos operacionales clásicos	13
2.2.1. Incertidumbre de las curvas de gasto	13
2.2.3. Incertidumbre de los eventos extremos	14
2.3. Desarrollo de la Hidrometría	14
2.3.1. Necesidad de modernizar la hidrometría	14
2.3.2. Batimetría y nivel del agua	15
2.3.3. El perfilador de corrientes Doppler (ADCP)	16
2.3.4. El radar	20
2.3.5. El LIDAR	20
2.3.6. Los velocímetros gráficos de partículas a gran escala (LSPIV)	21
2.3.7. Medidas desde el espacio	22
2.4. Conclusiones	23
3. Objetivos	24
3.1. Objetivo principal del estudio	24
3.2. Objetivos secundarios	24
4. Material y Métodos	25
4.1. Breve descripción del Prototipo Perfilador Acústico	25
4.2. Lugares de estudio	25
4.2.1. Tramo 1. Río Pisuerga a su paso por la localidad de Cordovilla la Real (Palencia)	26
4.2.2. Tramo 2. Canal de Villalaco en el término municipal de Villalaco (Palencia)	27

4.2.3. Tramo 3. Río Arlanza en el término municipal de Palenzuela (Palencia)	28
4.2.4. Tramo 4. Río Arlanza en el término municipal de Palenzuela (Palencia)	29
4.2.5. Tramo 5. Río Carrión a su paso por la localidad de Villanueva del Río (Palencia)	30
4.2.6. Tramo 6. Río Arlanzón a su paso por el término municipal de Palenzuela (Palencia)	31
4.3. Metodología	32
4.3.1. Metodología de Velocidad – Área	33
4.3.1.1. Medición del área	33
4.3.1.2. Medida de la velocidad	34
4.3.2. Metodología del Perfilador Acústico	36
4.3.2.1. Medida del área de la sección	37
4.3.2.2. Medida de la velocidad	40
4.3.2.3. Otras funciones importantes del perfilador acústico	41
5. Resultados	43
5.1. Comparativa Económica	43
5.1.1 Coste del instrumental de la metodología velocidad-área	43
5.1.2. Coste del instrumental del perfilador acústico	43
5.1.3. Desempeño del perfilador acústico	44
5.1.4. Tiempo de medición	45
5.1.5. Comparativa entre las metodologías	46
5.1.5.1. Medición de las áreas	46
5.1.5.2. Medición de las velocidades	46
5.1.5.3. Medición de los caudales	46
5.2. Conclusiones	48
6. Bibliografía	50
7. Anejos	52
7.1. Descripción de las secciones de los Tramos	52
7.1.1. Tramo 1. Río Pisuerga.	53
7.1.2. Tramo 2. Canal de Villalaco.	54
7.1.3. Tramo 3. Río Arlanza.	56
7.1.4. Tramo 4. Río Arlanza.	58
7.1.5. Tramo 5. Río Carrión.	59
7.1.6. Tramo 6. Río Arlanzón.	61
7.2. Etapas para la consecución del prototipo	63

1 Introducción

Estimar el valor del caudal que circula por un tramo fluvial resulta una actividad compleja, pero indispensable para la correcta gestión del recurso hídrico y de la integridad biológica del ecosistema del río y de la ribera asociada.

Conocer la morfología real de una cuenca y de un curso de agua es una tarea ardua, puesto que involucra el monitoreo de múltiples variables físicas (atributos), así como caracterizar la condición físico-química del agua, cuyas implicaciones en el estado ecológico global son conocidas.

España encabeza el ranking europeo de tasa de desertificación anual, y su relieve abrupto en algunas zonas críticas con cuencas muy ramificadas en múltiples cursos exige un esfuerzo de monitorización intenso del recurso hídrico (CNULD, 2010).

La necesidad de monitorizar los recursos hidráulicos e hidrobiológicos ha motivado una evolución histórica de los medios y las metodologías empleadas para conocer la condición de un ecosistema fluvial.

Durante la última década se ha producido un desarrollo notable de los sistemas y del instrumental de medición hidrométrica, incorporando una tecnología avanzada, con el objetivo de obtener aforos más confiables y rápidos. El principal problema remanente consiste en el elevado precio de los equipos más sofisticados en comparación con el de los equipos tradicionales.

Combinando la formación técnica recibida durante el período de formación del Máster de Ingeniería de Montes (interna y externa) con el conocimiento previo acumulado de diseño y manejo de tecnologías de drones, se ha diseñado, construido y calibrado un perfilador acústico de aforo en cauces naturales como trabajo académico de final de grado.

Este trabajo evalúa el desempeño del equipo desarrollado en colaboración con el Grupo de Ecohidrología Fluvial GEF de la Escuela Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia, al que pertenece el autor de este trabajo.

El desempeño del perfilador acústico de mínimo coste diseñado se ha contrastado con el del equipo tradicional de medición hidrotopográfica en conducciones abiertas, en distintas condiciones hidráulicas seleccionadas en cauces naturales y artificiales.

El análisis de los datos obtenidos en campo servirá para evaluar comparativamente la precisión de una tecnología clásica con amplia trayectoria frente a un nuevo prototipo de economía optimizada y futuro prometedor.

Otro objetivos de este trabajo, además de comparar estas metodologías, es analizar las implicaciones de las variables más influyentes a la hora de realizar un trabajo de hidrotopobatimetría fluvial, como son fundamentalmente el tiempo de medición, y el precio del equipo, entre otros.

2 Antecedentes

2.1 Hidrometría

2.1.1 Definición

La hidrometría es una parte de la Hidrología que tiene como propósito conocer el volumen de agua que atraviesa por unidad de tiempo una sección de transversal de una conducción abierta.

La hidrometría no solo se limita a medir el espacio ocupado por el agua, sino que normalmente precisa registrar múltiples parámetros de la sección transversal de la conducción. Estos datos reflejan la condición del punto concreto de medición, pero además también pueden servir para respuesta de la cuenca vertiente aguas arriba de dicha sección (de cierre) en términos de caudal líquido y/o sólido ante distintos escenarios hidrológicos reales y/o hipotéticos

2.1.2 Métodos tradicionales de aforo en conducciones abiertas

A continuación, se resumen los principales métodos empleados para estimar el caudal en sistemas a lámina libre. Se trata de una referencia técnica a partir de la cual valorar el aporte de esta investigación.

2.1.2.1 Método volumétrico

Su utilización se reduce a los ámbitos de laboratorio o para caudales pequeños. Con este sistema se modifica la trayectoria natural del flujo hacia un recipiente aforado, mientras se controla el tiempo que tarda en ocupar dicho volumen.

$$Q = V/t$$

Siendo Q el caudal (L/s), V el volumen del recipiente (L) y t el tiempo (s).

2.1.2.2 Método por dilución

Esta metodología está directamente relacionada con el estado de dilución en el interior de un río o canal de una solución trazadora vertida. Las restricciones habituales suelen ser la escasa profundidad de la corriente para accionar los instrumentos tradicionales de medición, grandes velocidades, turbulencias excesivas o zonas de difícil acceso.

Las dos variantes para realizar estos tipos de mediciones difieren en la aportación realizada del trazador, pudiendo ser por aporte continuo a un ritmo constante o de una sola vez. Para emplear este método, han de tenerse conocimiento de las siguientes variables:

- Aportaciones continuas o de una sola vez.
- La concentración del trazador en la solución que se aporta.

- La concentración del trazador en la corriente una vez que se haya diluido por completo en la sección transversal del cauce.

Cuando las condiciones de medición son favorables, la precisión obtenida de este método ronda el 5% (Lang et al. 2006). La mayor fuente de error reside en la dificultad de la aplicación del marcador.

2.1.2.3 Estructura hidráulica

Este método precisa de la instalación en el cauce de alguna estructura especialmente diseñada y ejecutada. Se basa en el principio hidráulico del flujo en vertederos, en los cuales el flujo es controlado (sección) mediante una relación concreta entre el caudal (Q) y la carga de vertido (h).

La precisión del método radica en el grado de precisión en la ejecución de la infraestructura, así como de las mediciones previa y posterior a la instalación del instrumental. La mayoría de estas infraestructuras constan de un tramo convergente en el cual el flujo inicialmente subcrítico se va acelerando hacia un punto de estrechamiento máximo. A continuación ocurre un ensanchamiento gradual hasta recuperar el flujo subcrítico (Figura 1).

Aguas arriba de la infraestructura existe un canal de aproximación que estabiliza las condiciones del flujo para la medición. Aguas abajo otro canal ralentiza el flujo para adaptarlo a las condiciones normales del cauce, y/o evitar su erosión.

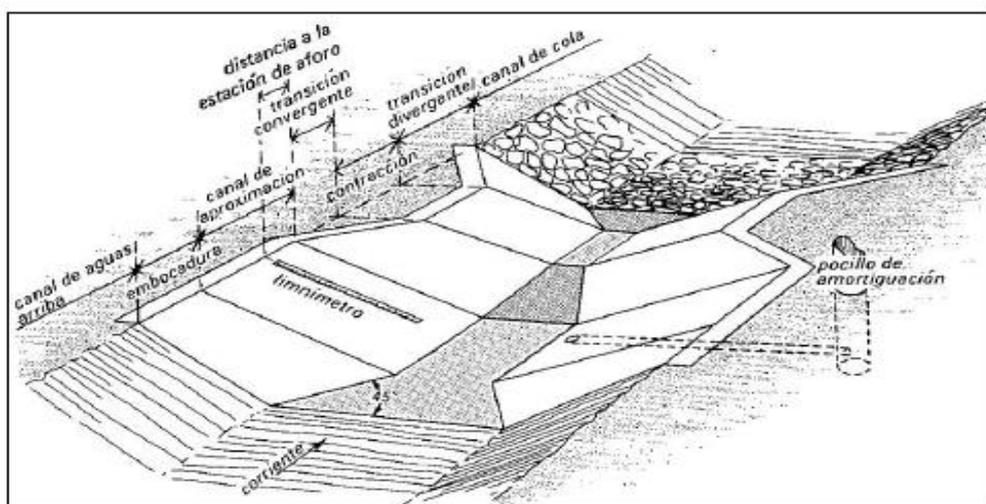


Figura 1. Aforador hidráulico en el interior del cauce (Bos et al, 1986).

2.1.2.4 Molinete hidráulico

La técnica de aforo con molinete hidráulico, conocida como "área-velocidad" es la más extendida. Su fundamentación teórica consiste en que la distribución de velocidad en una sección transversal con un flujo permanente y uniforme no es regular, por lo cual se requiere para su determinación medir velocidades puntuales en múltiples puntos de

la sección transversalmente distribuidos. La sección se divide en un número suficiente de subsecciones, que normalmente tienen igual anchura, si bien no es estrictamente necesario, en cada una de las cuales se registra la velocidad media vertical mediante una cantidad de mediciones a distintas profundidades, dependiendo del intervalo concreto en el que se encuentre el calado (Figura 2).

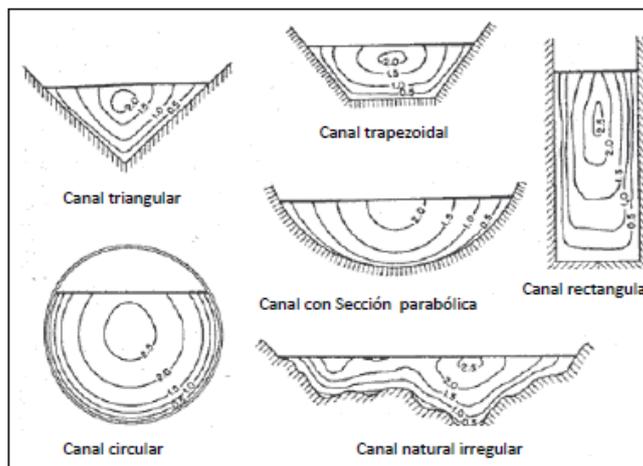


Figura 2. Distribución de velocidad (isotacas) en diferentes geometrías (Bos et al, 1986).

Integrando la contribución de todas las subsecciones o “celdas” se obtiene el caudal total circulante:

$$Q = \sum A_i \cdot v_i$$

Siendo “Q” el caudal total (m³/s); “A_i” el área de cada celda (m²); y “v_i” la velocidad media vertical de cada celda. De acuerdo con la Norma ISO 748:2007, el número “n” de mediciones verticales adecuado para canales pequeños (anchura de lámina de agua menor de 5 m) se indica en la siguiente Tabla 1. Cuando la anchura del flujo supera los 5 metros, la cantidad suficiente de verticales viene determinada de modo que la contribución de cada una de las celdas no debería superar el 5% del caudal total, y en ningún caso estar por encima del 10%.

Tabla 1. Número de celdas para aforo de canales pequeños (<5m) según la norma ISO 748:2007.

Anchura del canal	Número de verticales (n)
< 0.5 m	5 a 6
0.5 m – 1 m	6 a 7
1 m – 3 m	7 a 12
3 m – 5 m	13 a 16
>5m	>22

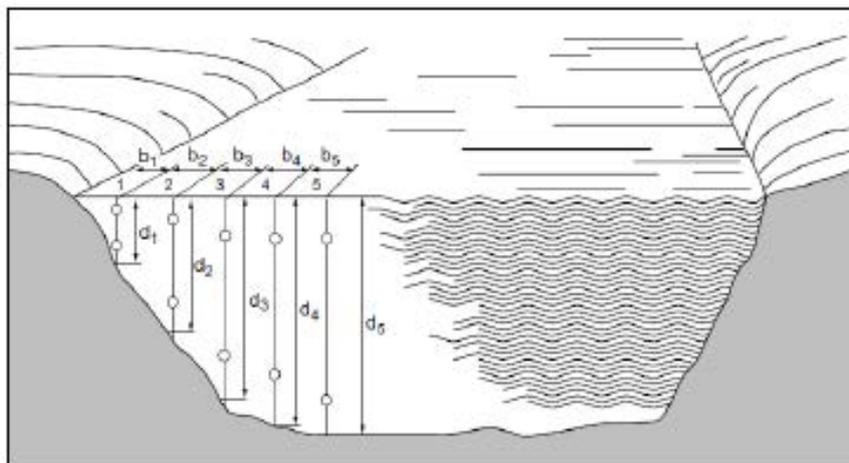


Figura 3. Medición de una sección en celdas para el aforo con molinete (OMM, 1994).

Las dos fuentes de error principales de este método son las siguientes: (1) representar simplificada la geometría del cauce mediante la interpolación entre un conjunto de puntos. (2) El tratamiento de un número limitado de mediciones puntuales en una vertical (celda) para determinar su velocidad media. Adicionalmente, hay que tener en cuenta los efectos potenciales del viento en el nivel de agua (profundidad), y de una eventual disposición de la sección no rigurosamente perpendicular al flujo (velocidad).

Este método es el más empleado para aforar corrientes naturales. El molinete más común es el mecánico con hélice (Figura 4). En este caso un eje horizontal soporta el giro de una hélice, cuyo tamaño en ocasiones se puede seleccionar para ajustarse al idóneo para las dimensiones concretas de la corriente.

El aparato se desplaza transversalmente de orilla a orilla en sucesivos puntos, registrando velocidades a diferentes profundidades conforme a los estándares pertinentes. La hélice se enfrenta a la dirección del flujo, y el número de revoluciones registrados en un tiempo de control se convierte a un valor de velocidad puntual (promedio temporal). El tiempo de medición varía desde aproximadamente 40 segundos en flujos más pulsátiles hasta los 10 segundos en condiciones más estables.

El cuerpo del molinete se sumerge mediante dos sistemas diferentes, dependiendo de las condiciones de vadeabilidad de la sección concreta.

- Barra graduada: empleada en aforos por vadeo, desde pasarelas o barcas, en aquellos cauces donde las velocidades no son altas. El principal condicionante reside en que el operador ha de portar el instrumental durante la medición.
- Cable lastrado: Suspendido entre dos estructuras en ambas orillas y que se desplaza de una a otra registrando las medidas en cada punto por el que atraviesa. Se utiliza para tramos de río donde resulta peligroso para el operario el tener que cruzar el cauce realizando estas mediciones portando el molinete.



Figura 4. Molinete mecánico de hélice.

(Fuente: <http://www.tecnologiayambiente.com.ar/caudal-puntuales/>, 20/05/2017).

Cada molinete suele disponer de un juego de hélices de distintos tamaños y pasos, para acomodarse a las condiciones del flujo del tramo de medición concreto. El abarcar diferentes rangos de velocidades con hélices distintas exige que estas deban ser calibradas periódicamente en sitios controlados, para garantizar la fiabilidad de sus respectivas ecuaciones.

Las causas de error del aparato pueden deberse a una mala calibración o al desgaste y desajuste del equipo. Existen ecuaciones para calcular la incertidumbre de una medición en base a las Normas ISO (Hersch, 2002).

Existe un instrumento similar, denominado medidor electromagnético (Figura 5), el cual carece de partes móviles. El principio de medida reside en la alteración del campo electromagnético que es inducida en función de la velocidad del del agua (Faraday). Su empleo es aconsejable cuando carga sólida en suspensión es considerable, condiciones que podrían dañar las partes móviles de un molinete mecánico.



Figura 5. Molinete electromagnético.

(Fuente: <http://www.tecnologiayambiente.com.ar/caudal-puntuales/> 20/05/2017).

2.1.2.5 Método ultrasónico

El principio físico sobre el que se basa la medición de la velocidad de la corriente, consiste en registrar la propagación de ondas sonoras por un fluido como es el agua. Para ello se colocan transductores que emitan las ondas y que otros reciban dichas ondas. La instalación se realiza ubicando un emisor en la orilla opuesta al receptor, con una desviación de entre 30 ° o 60° respecto de la dirección longitudinal del cauce.

De manera ideal, la colocación de los transductores ha de realizarse a la altura donde se registre la velocidad media de la corriente. Al sufrir variaciones la cota de la lámina de agua, se pueden aplicar coeficientes de corrección a los datos obtenidos en la medición.

Actualmente se disponen de dos tipos de sistemas de medición ultrasónicos.

- *Fijos*: La ubicación de los transductores están en una posición fija y la estación se calibra por medio de las correcciones deducidas de medir con el molinete hidráulico.
- *Móviles*: Los transductores se instalan sobre una estructura móvil en los bordes del cauce y se pueden regular tanto su posición como su profundidad. Al poder desplazarlos verticalmente, se pueden registrar las velocidades del agua en diferentes profundidades de la sección. En este método no es precisa la calibración de los datos por medio del molinete.

Para cada medición, se establece una curva de velocidad vertical para un rango de profundidades donde son efectivas las mediciones, tan grandes como sea posible.

En canales con poca diferencia entre las variaciones del nivel de la lámina de agua se puede establecer un sistema fijo de transductores. En el caso de que sí exista una gran variación, es necesario usar un recorrido múltiple y utilizar varios transductores localizados en diferentes cotas (Herschly, 1974).

La exactitud de esta metodología utilizando los principios ultrasónicos dependen de la precisión con la que se puedan registrar los tiempos del trayecto de las ondas del emisor hasta llegar al receptor (Lenormand, 1974).

2.1.2.6 Método electromagnético

El movimiento de las partículas de agua que fluyen por el lecho de un río, cortan la componente magnética de la polaridad terrestre, por lo que generan una fuerza electromotriz (*fem*) en el interior del cauce, susceptible de ser medida mediante la instalación de dos electrodos en este fluido.

La *fem*, es directamente proporcional a la velocidad media del río, por ser a la velocidad a la que se desplazan de media, las partículas que componen el fluido. Esta es inducida alrededor de un filamento conductor, que se instala de manera

perpendicular al flujo de la corriente y a la componente vertical del campo magnético de la Tierra.

En el diagrama de la Figura 6, se muestra la instalación del instrumental necesario para realizar las mediciones con esta metodología. Se coloca una bobina en el lecho del río sobre la dirección x, mientras la fem está en la dirección y. Perpendicular a ambos sistemas se encuentra la dirección de la corriente que es paralela al eje z. En base a la Ley de Faraday que regula la inducción electromagnética, relaciona la longitud de un conductor que se mueve dentro de un campo magnético con la fem generada (Herschy, 1974).

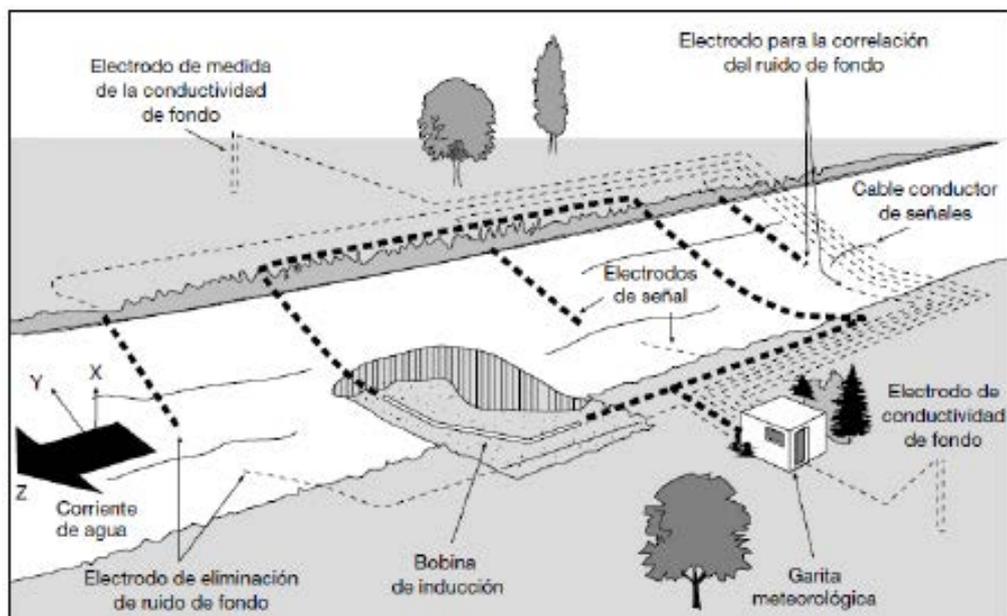


Figura 6. Esquema básico del método electromagnético (OMM, 1994).

Esta metodología es particularmente adecuada para usar en ríos con maleza, con alta concentración de sedimentos, o con unas condiciones adversas. De esto se deduce una medición de la velocidad media en la sección transversal que se puede combinar con el registro del nivel de la lámina de agua para obtener el valor del caudal.

La precisión de este equipo reside en la detección y la sensibilidad del instrumental eléctrico que detecta las oscilaciones del potencial que existe entre los dos electrodos. En teoría, el diseño y los materiales pueden registrar oscilaciones de la señal de hasta 100 nanovoltios (10^{-9} voltios), que representa una velocidad de casi 1 mm/s.

Una vez instalada la estación electromagnética de aforo, se precisa de una calibración in situ utilizando el molinete hidráulico o cualquier otro medio comparativo, para conocer la diferencia que existe entre las dos metodologías.

2.1.2.7 Método del flotador

Método empleado en la antigüedad, pero de gran utilidad si no se dispone de ningún otro medio para realizar las mediciones. Consiste en registrar el tiempo que emplea una partícula o elemento en suspensión en recorrer una distancia del tramo de la lámina de agua, impulsada únicamente por la corriente del propio río.

Esta velocidad superficial ha de convertirse matemáticamente en una velocidad media vertical. Para estimar el caudal hay que conocer previamente la geometría de la sección mojada. En condiciones favorables la precisión de este método ronda el 10% (Rantz, 1982).

2.1.3 Estaciones de aforo clásicas y la curva de gasto

La finalidad de una estación de aforo es proporcionar estimaciones de caudal de modo continuo con frecuencias de registro variadas dependiendo del equipamiento concreto de la misma. La geometría de la sección de control es conocida con exactitud, así como la función matemática que relaciona la altura de la lámina de agua con el caudal circulante o curva de gasto (curva de calibración). Las ecuaciones de gasto más utilizadas son las dos siguientes (Rantz et al., 1982):

- *Exponencial* $Q = a (h - Z_0)^n$

Siendo:

h: nivel de la lámina de agua.

Z₀: cota del punto más bajo de la sección.

a, n: Coeficientes de ajuste específicos de la sección.

- *Polinómica*

$$Q = a_0 + a_1 \cdot h + a_2 \cdot h^2 + \dots + a_n \cdot h^n$$

Siendo:

h: nivel de la lámina de agua.

a_n: Coeficientes de ajuste.

2.1.3.1 Clasificación de las curvas de gasto

Según Jaccon (1990) existen dos tipos de relaciones funcionales entre el nivel de agua y el caudal, dependiendo de la consistencia de su respuesta en el tiempo.

- **Relación biunívoca**

Ocurre cuando la sección es estable y se ha establecido un único punto de control, de modo que las funciones son invariables, ya sea una geometría regular más prismática como la Figura 7, o bien irregular como la de un cauce en la Figura 8.

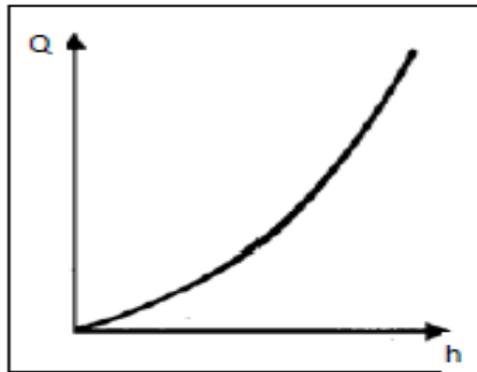


Figura 7. Curva de gasto de una sección regular (Jaccon, 1990).

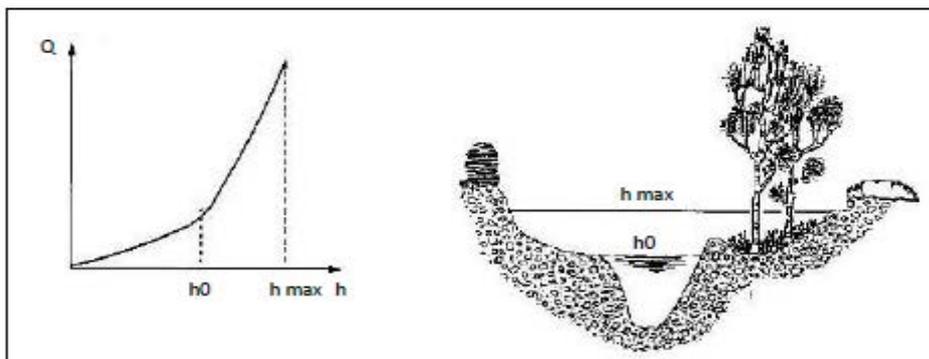


Figura 8. Curva de gasto en una sección irregular (Jaccon, 1990).

- **Relación no unívoca**

Cuando al valor de una variable le corresponden dos o más valores de la función, la relación se define como no unívoca. La Figura 9 muestra diferentes escenarios de relaciones variables. Los procesos de erosión o sedimentación se reflejan en curvas del tipo A o tipo B. Cuando la erosión y la sedimentación se producen ambas dentro de un breve periodo de tiempo, el caudal en la rama ascendente de la crecida es menor que la rama descendente, como reflejan las curvas tipo C.

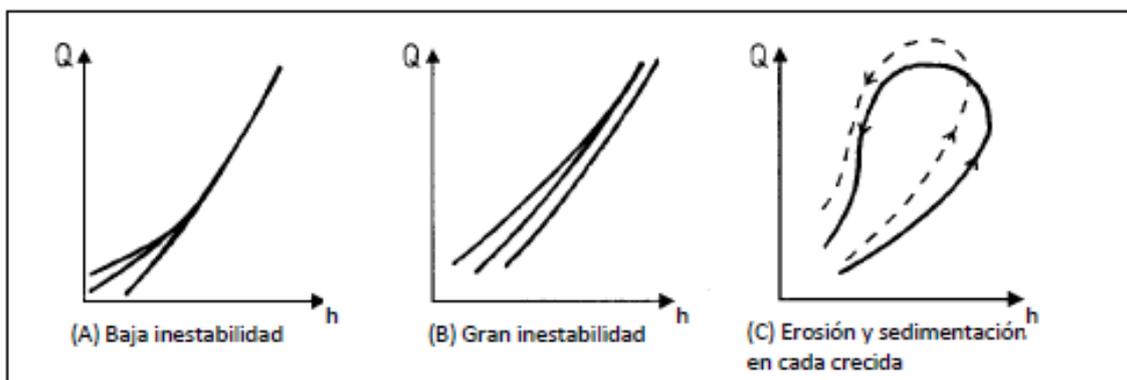


Figura 9. Curvas de gasto con sección inestable (Jaccon, 1990).

2.2 Limitaciones de los métodos clásicos

En este apartado se describen las principales incertidumbres y limitaciones en la estimación de las curvas de gasto.

2.2.1 Incertidumbre de las curvas de gasto

La metodología para estimar la curva de gasto cuenta con un gran número de incertidumbres, y muchas de estas alteraciones son factores que se modifican con el tiempo, con el caudal y en el intervalo entre una crecida del nivel de las aguas y la siguiente. Por estos motivos, es preciso determinar unas cuantificaciones previas.

Las múltiples posibilidades que arrojan incertidumbres en la cuantificación de las curvas de gasto han de ser evaluadas y valoradas en función de las variaciones razonables de los parámetros correspondientes. La base de estas valoraciones será el análisis de sensibilidad de las variaciones en la relación entre nivel-caudal a las variaciones de dichos parámetros (Valverde, 2002).

- Variaciones temporales del cauce

Los ríos son dominios hidráulicos dinámicos, los cuales cambian su conformación (estructura) y su respuesta hidráulica, pudiendo notarse incluso una diferencia en la morfología del cauce por causas naturales o antrópicas.

- Curvas de remanso

Existen actividades o infraestructuras en el cauce que son realizadas en un punto concreto del río (perturbación localizada), pero que rigen el perfil hidráulico de un tramo de longitud considerable aguas arriba (flujo permanente gradualmente variado).

- Histéresis

Este fenómeno que relaciona el nivel con el caudal implica que cuando ambos aumentan en el tiempo, sus valores serán menores, para un mismo caudal, que los valores en el periodo de tiempo donde disminuye dicha crecida. Esta situación provoca que la relación Q-nivel no sea biunívoca, y dificulte por tanto la finalidad de la curva.

2.2.2 Variabilidad temporal de la curva de gasto

La estimación del caudal se hace de manera puntual en el tiempo. Por ello, se obtiene un valor de la relación existente entre el nivel y el caudal que en rigor resulta válida solamente para el momento preciso de la medición, y en consecuencia no sería extrapolable en el tiempo en sentido estricto.

En corrientes naturales la relación entre el nivel y el caudal no puede definirse en muchas ocasiones mediante una relación única. Al ser el flujo generalmente lento, no es raro que las condiciones locales en el sitio de medición estén afectadas (controladas) por una perturbación natural y/o artificial ocurrida aguas abajo, como

remanso por la vegetación, áridos, rocas, o cualquier elemento arrastrado. En el caso del régimen transitorio, como por ejemplo situaciones de crecidas, no se mantiene una relación directa entre nivel y el caudal debido a los procesos de aceleración o deceleración de la corriente.

Debido a estos fenómenos, y especialmente en cauces naturales, se requiere de un sistema continuo de comprobación de la curva de gasto para garantizar su validez. Se debiese realizar de forma periódica y sistemática de aforos directos.

2.2.3 Incertidumbre de los eventos extremos

- ***Estiaje***

Existen múltiples razones que dificultan el monitoreo del caudal con el instrumental clásico en los periodos de estiaje:

- Los molinetes hidráulicos no funcionan en su rango óptimo, pues necesitan un nivel mínimo de agua para que se encuentren completamente sumergidos.
- La alteración de la sección por procesos de sedimentación y erosión por causas aluviales, en donde se modifica el área de esta sección.

- ***Crecidas***

Dentro de una crecida, se registran grandes niveles de agua y con gran velocidad. Normalmente también se asocia a este fenómeno el transporte de materiales del cauce por arrastre. Las mediciones en estas circunstancias son complicadas:

- Las altas velocidades del agua y los elementos arrastrados ponen en peligro a los operarios que realizarían eventualmente la medición.
- El caudal y el nivel de agua pueden variar rápida y marcadamente, comprometiendo la medición si precisa de mucho tiempo (Creutin et al. 2003).

2.3 Desarrollo de la Hidrometría

2.3.1 Necesidad de modernización

Es constatable la poca evolución tecnológica que ha experimentado la hidrometría durante el siglo XX. Cheng (2000) compara la hidrometría con la medicina y concluye “Mientras que los instrumentos médicos han tenido una evolución fantástica durante el siglo XX, permitiendo avances científicos importantes, el desarrollo de la hidrometría parece estar en un punto muerto”, tal como se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Aforo con molinete en 1909 y en 1996 (Hauet, 2006).

Por este aspecto, la USGS creó en 1996 el grupo HYDRO 21 con el objetivo de identificar y evaluar las nuevas tecnologías y métodos con potencial de cambiar el protocolo clásico de aforo de dicha institución.

2.3.2 Batimetría y nivel del agua

Mediante los principios físicos de propagación de ondas en un fluido y su rebote, como si fuese un radar, se pueden realizar batimetrías de la sección del cauce. Este sistema derivado de la geología responde a la terminología de Ground Penetrating Radar (GPR).

Las investigaciones y estudios realizados por el equipo de Hydro 21 (Haeni et al, 2000) han demostrado que el GPR permite una estimación de la batimetría con un error del orden de 8%. Este error depende principalmente de la conductividad del agua del río (Costa et al, 2006).

Los sensores de ultrasonidos no son una novedad, pues se emplean con frecuencia en las mediciones dentro del agua. En este fluido se propagan las ondas que parten de un sensor, rebotan con un obstáculo con una densidad mayor a la del fluido y regresan nuevamente al sensor. Midiendo el tiempo desde que se emite la onda hasta que se registra nuevamente la oscilación en el sensor y conociendo la velocidad de propagación de una onda en el agua.

Los distanciómetros ópticos, utilizan el mismo principio físico de funcionamiento que los ultrasonidos, pero sustituyéndolo por haces de luz.

Varios estudios (Frappart et al, 2006; León et al, 2008) entre otros muchos, han demostrado las ventajas que presenta la altimetría radar por satélite para medir las oscilaciones que sufren los niveles de aguas superficiales continentales.

De estos estudios pueden extraerse una nutrida base bibliográfica que muestran la precisión y los registros tan abundantes que son capaces de registrar un instrumental como este.

Dichas mediciones se definen como las estaciones virtuales. Este término se aplica a toda aquella intersección existente entre el barrido que realiza un satélite y un plano de agua continental, registrando de la serie de datos la variación de los niveles superficiales del agua (León et al, 2011).

2.3.3 El perfilador de corrientes Doppler (ADCP)

El origen de los perfiladores acústicos por efecto Doppler fue el medir la velocidad de las corrientes oceánicas. El USGS utilizó los ADCP por primera vez en 1985 y publicó la descripción de este sistema para establecer mediciones del caudal a tiempo real con este sistema en 1993 (Simpson & Oltmann, 1993).

Los ADCP son una realidad hoy en día, pues se consideran una de las herramientas más versátiles para medidas fluviales, siendo varias las empresas que se dedican a su fabricación como son RDI (1996) o SonTek (2000).

La utilización de medidores acústicos de velocidad y los ADCP ronda el 30% del instrumental actual para monitorizar los caudales por parte del USGS (2005). Se han adquirido para sustituir la gran mayoría de los medidores mecánicos en embarcaciones del USGS.

El ADCP es capaz de registrar tanto la dirección como la velocidad y de dos corrientes diferentes dentro de la misma columna de agua. Los instrumentos mecánicos carecen de esta posibilidad a no ser que utilicen alguna técnica espectral.

Los ADCP han de mantener sus sensores en todo momento en contacto con el fluido donde van a realizar las mediciones, que en este caso es el agua. De esta manera la propagación de las ondas no realiza cambios de fase, que son un grave problema en la mecánica de propagación de ondas y una dificultad para registrar los valores de las mediciones.

Cada sensor emite un haz de ondas que se reflejan en las partículas en suspensión o burbujas existentes en el agua, para regresar al receptor. Esta técnica toma como principio fundamental para la medición que las burbujas y las partículas viajan a la misma velocidad que el agua dentro de la corriente. Una fracción de la onda es reflejada por el mismo haz hasta el emisor.

La onda reflejada tiene una frecuencia distinta a la emisión de un sistema por efecto Doppler en 1842 donde se establece que la variación de la frecuencia es proporcional a la componente de la velocidad de las partículas en suspensión dentro de un fluido según el eje que une las partículas con el emisor.

Se puede instalar el sistema ADCP sobre embarcaciones orientadas hacia el fondo o situarse en el fondo del cauce hacia arriba o hacia la orilla como se muestra en el esquema de la Figura 11.

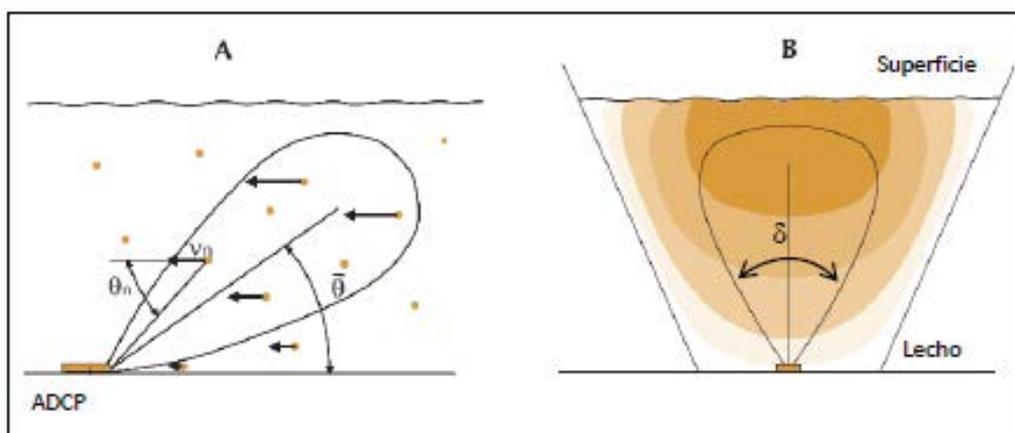


Figura 11. Principio de la medida de la velocidad por el efecto Doppler (A) según la sección longitudinal o según la sección transversal (B) (Birgand et al, 2005).

El ADCP emite una onda ultrasónica sinusoidal con una frecuencia F_s , que forma un ángulo θ_n con la dirección del fluido. Esta onda se propaga en forma de un cono con ángulo sólido δ ; este cono corresponde al volumen de medida explorado en el seno del flujo por el sensor.

La onda ultrasónica está reflejada hacia el sensor, principalmente por las partículas en suspensión o las burbujas de aire transportadas por el flujo de agua, con una frecuencia diferente f_{ns} . La variación de la frecuencia $\Delta f_{D,n} = f_s - f'_{ns}$ es proporcional a la velocidad de desplazamiento de las partículas reflejadas según la siguiente fórmula:

$$V_n = \frac{C \cdot \Delta f_{D,n}}{2 \cdot f_s \cdot \cos \theta_n}$$

Siendo:

V_n	Velocidad media del flujo en el sentido del flujo (m/s)
C	Velocidad de propagación del sonido dentro del agua (m/s)
$\Delta f_{D,n}$	La variación de la frecuencia entre la emitida y la recibida (Hz)
f_s	Frecuencia de emisión (Hz)
θ_n	Ángulo que forman los ultrasonidos emitidos con el sentido del flujo (rad)

Las fuentes de incertidumbre sobre la velocidad V_D están relacionadas con las magnitudes C , θ y la variación de la frecuencia $\Delta f_{D,n}$.

Un error en la estimación del ángulo θ , debido a una mala instalación, o a la existencia de un lecho móvil debido a un transporte de sedimentos, o un cambio del sentido del flujo, puede provocar un error significativo sobre la V_n , ya que está inversamente proporcional al $\cos \theta$. El resultado es por tanto muy sensible al valor θ .

Si el haz de onda ultrasónica fuera enviado en una sola dirección, y las velocidades de la columna de agua fueran estrictamente idénticas, las n partículas situadas en el haz de la onda enviarán n veces la misma señal que corresponde a la misma variación de frecuencia como se indica en el esquema de la Figura 12.

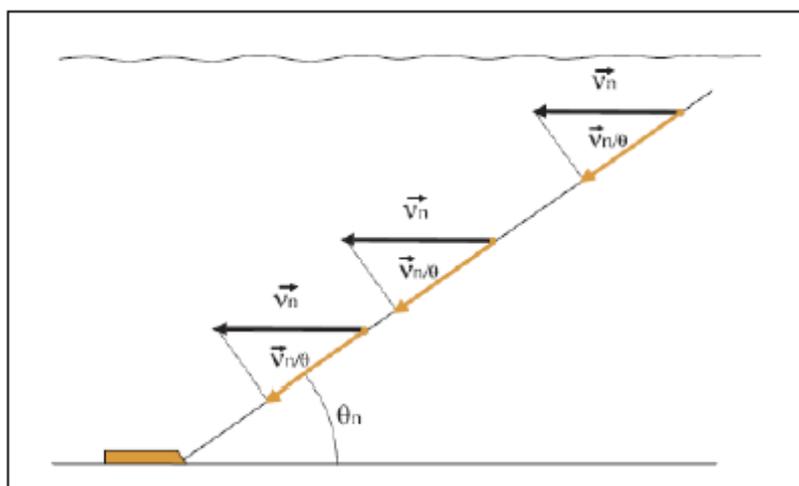


Figura 12. Representación esquemática de la componente en función de la dirección del haz ultrasónico (Birgand et al., 2005).

En realidad, la onda ultrasónica no está emitida en una sola dirección, más bien en el ángulo sólido. Cuando una partícula atraviesa el haz de onda ultrasónica a la misma velocidad desplazándose del punto A hacia el C, la componente de la velocidad medida varía en función del ángulo θ .

La variación de la frecuencia detectada por el ADCP no es la misma según la posición de la partícula. Sin embargo, para el cálculo de la velocidad, se utiliza en los cálculos el mismo ángulo del haz θ_n , de tal modo que diferentes valores de la misma velocidad serán estimados según la posición de la partícula dentro del haz de onda ultrasónica.

Así mismo, haciendo el mismo razonamiento, en un instante dado las partículas repartidas dentro del haz del ADCO, envían varias señales diferentes. Para ello, la variación de la frecuencia $\Delta f_{D,n}$ se analiza después del tratamiento de las señales recibidas por el sensor. La calidad de este análisis depende de las técnicas utilizadas por cada fabricante.

Estas técnicas están casi siempre patentadas, y suelen representar una caja negra para su análisis (Bertrand et al, 2000). Este hecho, conlleva a que las medidas obtenidas presentan frecuentemente fluctuaciones en forma de dientes de sierra.

La velocidad de propagación de las ondas de ultrasonidos, C , en el agua interviene de un modo directamente proporcional en la estimación de V_d . Ésta última varía en función de la temperatura y de la salinidad del flujo.

En lo que concierne a la temperatura, la mayoría de los ADCP llevan un sensor para la medición de temperatura para corregir el valor de la velocidad C . En lo que concierne a la salinidad hay que estar atento a las condiciones del entorno. En las zonas con influencia de aguas del mar, el error puede llegar al 3,5% en relación con el agua dulce (Bertrand et al, 2000).

El ADCP instalado en el fondo requiere un mantenimiento continuo, ya que sus sensores pueden quedarse inactivos por la sedimentación y obtener mediciones erróneas. La instalación consiste en colocar ADCP sobre un flotador que sigue libremente las variaciones del calado. El sensor está orientado hacia abajo y mide la velocidad desde la superficie en dirección de la solera.

El USGS ha procedido a diversas evaluaciones en sus laboratorios y en el terreno de diferentes enfoques utilizando el ADCP (Morlock et al, 2002) para concluir que esta tecnología es apropiada para aplicarla en su red de estaciones hidrométricos y para la obtención de datos de caudales en tiempo real con una calidad aceptable.

El enfoque utilizado por USGS para la medición en la lámina libre con el ADCP es el índice de velocidad, que consiste en relacionar la velocidad media en una sección con la velocidad del flujo medio por el ADCP en una parte de la sección.

Esta relación en la mayoría de los casos es lineal, lo que facilita su derivación y requiere menos datos para su obtención que una curva de gasto, generalmente más compleja (Figura 13).

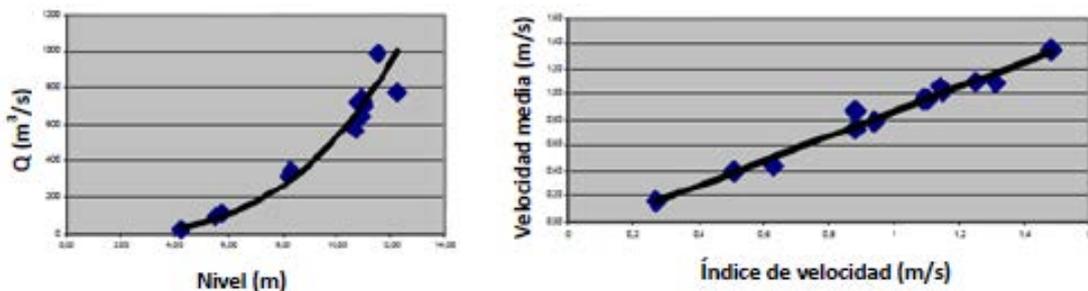


Figura 13. Relaciones funcionales nivel-caudal (izqda) e índice-velocidad (dcha) en el río Foresman, USA (Ducharme et al, 2003).

La organización Environnement Canada (EC) ha evaluado y comparado los dos enfoques anteriores en dos ríos de Canadá, por un lado el limnómetro y la curva de gasto, y por otro lado el ADCP y el índice de velocidad, obteniendo una desviación media entre los datos medidos y los datos de referencia del 4,1% en el caso del método ADCP-índice de velocidad y del 12,8 % en el caso de la curva de gasto. Esto demuestra que el nuevo método desarrollado por el USGS ofrece mayor precisión.

2.3.4 El radar

El comienzo para a medición de microondas para la medida de velocidades se realizó por parte del equipo de William Plant en Seattle (EEUU) (Plant et al, 2005). El principio físico en el que se basa para realizar las mediciones, reside en monitorizar el desfase entre la onda emitida y la reflejada con una alteración en su posición debido a la rugosidad del medio acuático o turbulencias de distinto origen.

Un haz formado por una antena parabólica permite iluminar una elipse de la superficie del rio en la cual, el sensor mide una velocidad media proyectada sobre un eje establecido. Esta elipse, por lo general no coincide con su posición original y sufre una variación que se puede registrar en sus ejes. Esto permite pasar a un perfil transversal de velocidad de la superficie.

La medición de las velocidades en la superficie ofrece un margen de error máximo de un 10% (Lee et al, 2002). Considerando una sección vertical de un tramo en donde aparece un registro de velocidades dado, la velocidad media del cauce puede ser deducida de la velocidad superficial (Plant et al, 2005, Lee et al, 2002).

Esta técnica ha sido utilizada combinando el GPR y el radar para obtener, desde un helicóptero, una medida de la batimetría y velocidades desde la superficie de la lámina de agua en el Cowlitz River, EEUU según Melcher et al (2002).

Esto ha permitido estimar un caudal muy próximo al caudal referencia con un error del 5% con la metodología que se muestra en la Figura 14.

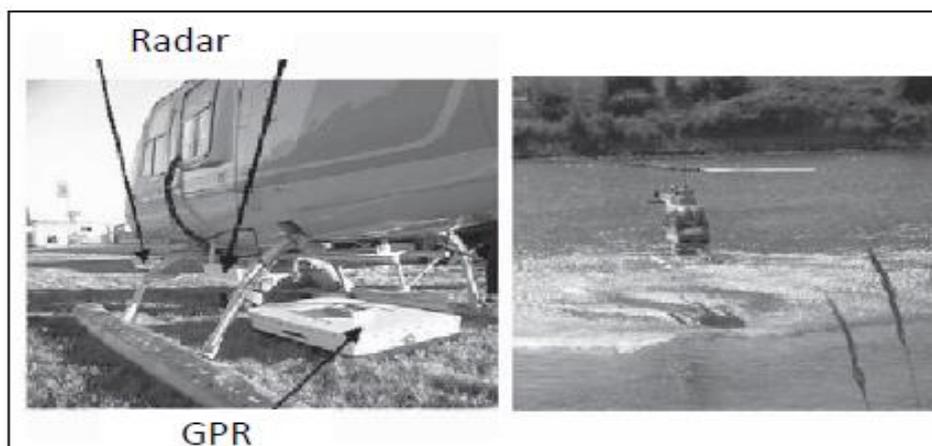


Figura 14. Helicóptero y su instrumental de medida con la técnica de radar y GPR (Hauet, 2006).

2.3.5 EL LIDAR

El funcionamiento del LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) es el mismo que el radar, la diferencia radica en el rango espectral sobre el que funciona. El radar trabaja con ondas de radio, mientras que el Lidar opera en el espectro de la luz visible y en sus proximidades dentro del ultravioleta e infrarrojo.

2.3.6 Los velocímetros gráficos de partículas a gran escala (LSPIV)

Los dispositivos LSPIV son instrumentos emergentes que se basan en la técnica de unas imágenes denominada velocimetría gráfica de partículas (PIV), que se utiliza en laboratorios de fluidos.

Los velocímetros gráficos de partículas son capaces de medir los vectores instantáneos de velocidad en numerosos caudales generados en el entorno controlado de un laboratorio (Adrián, 1991).

La técnica registra la imagen como información digital sin procesar, que puede reprocesarse en función de las necesidades con arreglo a diferentes resoluciones espaciales y temporales.

Estas ventajas han hecho que los velocímetros gráficos se hayan convertido rápidamente en el método preferido para obtener mediciones con gran nivel de detalle en flujos de laboratorio. Fuera de estos ambientes, resulta complicada aún su aplicación.

Las primeras mediciones de velocimetría gráfica en entornos fluviales fueron realizadas en Japón por Fujita y Koruma (1994), requiriendo la formación de grandes sectores de la superficie del río, motivo por el que esta técnica se bautizó como PIV a gran escala.

La técnica LSPIV abarca la totalidad de los cuatro componentes habituales de los procesos PIV siendo la iluminación, marcado de caudal, registro de imágenes y procesado de las mismas. Estas imágenes se suelen obtener desde un ángulo oblicuo, por lo que es preciso realizar una corrección de las mismas. La medición se inicia desde la toma de imágenes de la superficie del agua desde una posición estratégica dentro del cauce que ha sido elegida previamente. El movimiento de la superficie de la lámina de agua solo es perceptible si tiene elementos visibles que se muevan con la corriente.

En muchas situaciones aparecen elementos flotantes en el río que se generan de forma natural como puedan ser la espuma, sifonamientos, pequeños residuos y ondulaciones en la propia lámina de agua. Estos elementos se emplean de forma eficaz como elementos visibles trazadores del caudal. En caso de que no existan tales perturbaciones, pueden llevarse a cabo por medio de un marcado artificial de la zona. Esto se muestra en el esquema de la Figura 15.

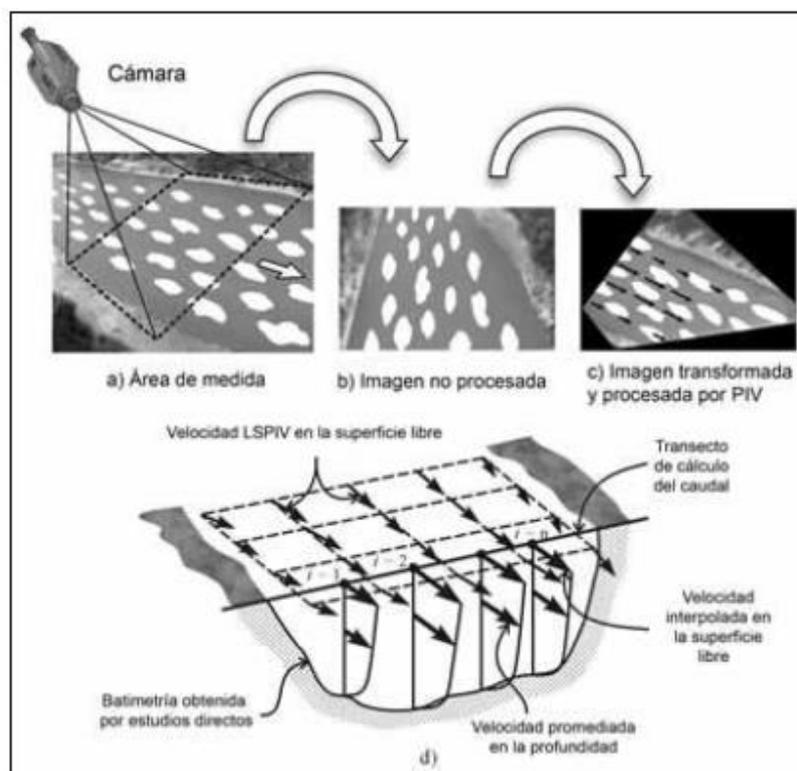


Figura 15. Fundamento y componentes operativos de los velocímetros gráficos de partículas a gran escala (LSPIV) (Muste et al, 2008).

Las imágenes registradas se deforman geoméricamente debido a la posición de la cámara respecto de la lámina de agua. El movimiento se registra por diferencia de elementos que aparezcan en pares de imágenes consecutivas. Posteriormente se calculan las velocidades de toda la imagen dividiendo los desplazamientos estimados por el intervalo de tiempo existente entre imágenes sucesivas.

El caudal se determina por métodos de área-velocidad. La velocidad de la superficie del agua medida por el sistema LSPIV se ajusta para ofrecer una mejor estimación de la velocidad medida en la columna de agua, y se multiplica por la sub-área correspondiente a la batimetría de la sección transversal. La batimetría del cauce puede estudiarse con otros medios especializados, como el dispositivo ADCP. Una vez conocida la sección del cauce que se contempla como invariable en los tiempos de demora entre la medición de ambos instrumentales.

2.3.7 Medidas desde el espacio

La cuantificación del caudal mediante instrumental situado en un satélite necesita conocer la relación hidráulica existente entre el caudal y los parámetros que son capaces de monitorizarse desde el espacio (Vorosmarty et al, 1996). Estos parámetros son la anchura del río (por análisis de la imagen satelital), el nivel del agua (por altimetría radar), la rugosidad del río, la morfología del río (sinuosidad, meandros, etc.) y la velocidad en la superficie (radar, Lidar o Doppler).

Las limitaciones principales del satélite son su precisión, incertidumbre del orden de 50 cm en el nivel de agua (De Oliveira Campos et al, 2001), y del orden de 0,1 m/s en las velocidades en superficie (Bjerklie et al, 2003). Además de su resolución espacial (el ancho del río debe ser al menos 200 m para estimar el nivel de agua, y solo dos o tres puntos de medida de velocidad en superficie son posibles sobre una sección transversal el nivel del agua, y solo dos o tres puntos de medida de velocidad en superficie son posibles sobre la sección transversal con tales condiciones). Es de concluir que la hidrometría satelital es factible para grandes ríos.

2.4 Conclusiones

Tanto la metodología, como el instrumental y sus calidades han avanzado enormemente, ofreciendo una amplia gama de productos y métodos para obtener información de los caudales y de las propiedades físicas del agua y de los cauces.

La complejidad de parte del instrumental que anteriormente se ha mostrado, dificulta el acceso a las labores de monitorización de los cauces. Muchas de estas metodologías precisan de elementos constructivos dentro del cauce, siendo invasivos, costosos y de una única utilidad al registrar el caudal que circula en ese punto exacto del río y siendo ajeno a perturbaciones aguas arriba y aguas abajo del mismo.

Por el contrario, algunos son extremadamente simples, resultando poco precisos y trabajando por lo tanto con datos poco fiables. Algunos tienen un nivel tecnológico muy avanzado y además de resultar una inversión inicial costosa, precisan en todo momento de personal técnico especializado para su utilización.

En este caso, suelen ser instrumental portátil que es fácilmente transportable de un cauce a otro. En ocasiones puntuales pueden necesitar de elementos auxiliares que porten este instrumental, los cuales no sin siempre son asequibles para los equipos de trabajo ni accesibles a zonas de medición.

3 Objetivos

3.1 Objetivo principal

El objetivo fundamental de la investigación es evaluar comparativamente el desempeño de la metodología más extendida para realizar batimetrías de cauces naturales vadeables frente a un perfilador acústico.

Los criterios principales utilizados para la comparación son:

- La precisión en la medición de la variable “área” de la sección batimétrica.
- La precisión de la medición de la variable “velocidad” de la sección batimétrica.
- La precisión del caudal calculado a partir de las variables área y velocidad.
- El tiempo de medición invertido con ambas metodologías para obtener registros con unos niveles de precisión establecidos.
- Los recursos económicos necesarios para disponer de los equipos necesarios para emplear cada metodología.

3.2 Objetivos secundarios

- Obtener información sobre el comportamiento del perfilador acústico desarrollado, su calibrado e identificación de las limitaciones que tiene respecto de otras metodologías de toma de información ya existentes.
- Generar recomendaciones sobre el uso y precisión del perfilador acústico en la posterior utilización para realizar secciones de batimetría y desarrollo en el campo de la hidrotopografía.
- Escalabilidad del perfilador acústico.
- Detectar los posibles riesgos laborales en la toma de información de aspectos físicos del interior de un cauce mediante la utilización de las dos metodologías.

4 Material y Métodos

4.1 Breve descripción del Prototipo Perfilador Acústico

El equipo de perfilador acústico es un instrumental portátil, capaz de transportarse en el maletero de un vehículo turismo. Se compone del propio perfilador acústico y de la emisora de radio control que se utiliza para su manejo y dirección desde la orilla.

Las dimensiones aproximadas del perfilador acústico son de una longitud de un metro, por un ancho de 50 cm y una altura de 40 cm si la antena del sistema de recepción GPS se encuentra abatida. En funcionamiento, puede superar los 80 cm la altura del instrumental durante el proceso de medición.

El peso aproximado del perfilador es de 7 kg con todo el instrumental incorporado, la emisora que porta el operario ronda los 400 g. Este perfilador es fácil de transportar por dos personas desde el vehículo hasta la orilla, debido al volumen del instrumental y a la orografía tradicional que suele dar acceso a las orillas del cauce y las riberas. Por una persona, resulta un traslado más difícil, pero totalmente viable, portando el perfilador la propia persona o con ayuda de un carro o soporte auxiliar específico para ello.

El sistema de propulsión es de alimentación eléctrica, con una disposición del propulsor que no se introduce dentro del flujo de agua, siendo una ventaja en cuanto a mantenimiento, maniobrabilidad; y siendo un diseño que no altera el ecosistema fluvial ni perturba el medio donde se está realizando las mediciones.

La alimentación de las que se dispone es una batería de litio polímero de 5.200 mAh intercambiable, portando el perfilador una única batería que da una autonomía de 25 minutos en condiciones de trabajo habituales. Se dispone de un grupo de 3 baterías, se puede estar operando 75 minutos útiles de medición.

Su periodo de carga es de 2,5 a 3 horas desde un cargador conectado a la toma de corriente del vehículo o una fuente de energía externa (batería auxiliar, toma de corriente de una instalación eléctrica doméstica, etc.). Estas baterías tienen un peso de 520 g cada una.

4.2 Lugares de estudio

Los tramos de estudio se localizan dentro de la propia provincia de Palencia, buscando los diferentes regímenes hidráulicos de conducciones de agua. Se ubican en los principales ríos de la cuenca hidrográfica del Duero que atraviesan la provincia de Palencia y alguna canalización de agua de origen antrópico (Figura 16).

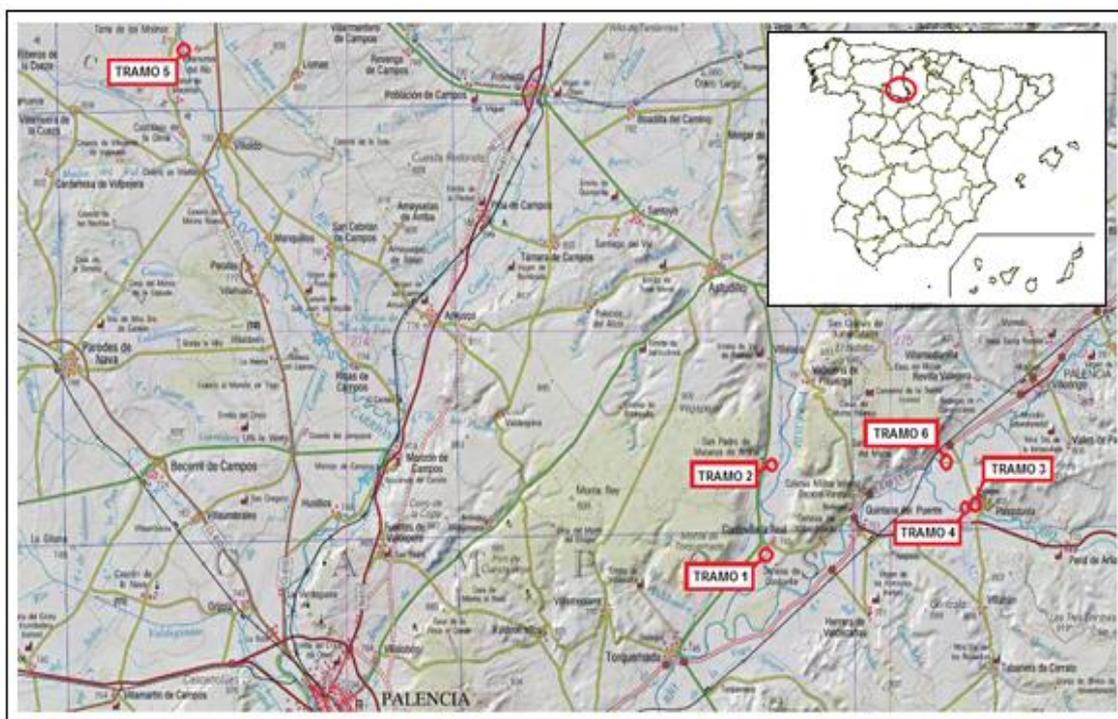


Figura 16. Croquis sin escala de la localización de los tramos de estudio.

La investigación está dirigida a comparar el comportamiento de los diferentes instrumentales para levantar batimetrías, por lo cual que se ha optado por efectuar las mediciones en unas mismas condiciones hidráulicas con las herramientas, pero en condiciones hidráulicas muy diversas y normales.

Como el instrumental del que se ha dispuesto es portátil, los tramos de estudio están distribuidos por la red hidrográfica de la provincia de Palencia (España).

Las condiciones ambientales en las que se han realizado las mediciones han sido en todos los tramos favorables. Tanto la ausencia de precipitaciones como de viento, han logrado unas situaciones del medio, que no han supuesto un incremento de perturbaciones en el río y dificultasen la labor de toma de muestras. A continuación, se describen las condiciones hidráulicas ensayadas.

4.2.1 Tramo 1. Río Pisuegra a su paso por la localidad de Cordovilla la Real (Palencia).

Tramo medio del río Pisuegra a su paso por la localidad de Cordovilla la Real, municipio del sur de la provincia de Palencia. Se encuentra a unos escasos 500 metros aguas abajo del puente que comunica el núcleo del municipio con la carretera P-412.

La profundidad media de la sección es de 0,42 metros y la velocidad media se registró en las condiciones del estudio 0,51 m/s. La anchura de esta sección es de 16,60 metros.

Se trata de un cauce natural, con velocidad moderada y sección fácilmente vadeable. El lecho está compuesto de gravas y algunos cantos, con ausencia de vegetación. La vegetación de ribera en ambas márgenes son alisos bajo una cubierta de chopos, los cuales no impidieron los trabajos de medición.

El acceso se realizó más fácilmente desde la margen derecha, donde hubo que superar un pequeño desnivel del talud horadado por la corriente. En la margen izquierda la vegetación es más densa, pero no hay indicios de erosión, sino cúmulos de sedimentación de gravas finas y arenas.



Figura 17. Levantamiento de la sección batimetría en el tramo 1.

4.2.2 Tramo 2. Canal de Villalaco en el término municipal de Villalaco (Palencia).

Tramo de la canalización para el abastecimiento agrícola, junto a una de las compuertas de regulación. El acceso se encuentra junto a su paso bajo la carretera P-412 en el punto kilométrico 9,3.

La profundidad media en este caso es uniforme en toda la sección, siendo 1,2 metros. La velocidad media calculada es de 0,55 m/s.

La infraestructura de riego es una construcción relativamente reciente. Se trata de un canal artificial de hormigón con perfil rectangular. El ancho uniforme a lo largo de toda la canalización es de 4 metros, con una profundidad también regular de 1,60 metros hasta el borde de la infraestructura.

El acceso se realiza desde la propia carretera y se encuentra libre de vegetación en sus inmediaciones. Cuenta con una infraestructura de compuertas para la regulación

del caudal con una pasarela que permite cruzar de un lado a otro del canal y poder realizar las mediciones con los instrumentos de la metodología de velocidad-área.



Figura 18. Medición de la sección batimétrica del tramo 2 del estudio.

4.2.3 Tramo 3. Río Arlanza en el término municipal de Palenzuela (Palencia).

Tramo del río Arlanza aguas abajo desde el puente de acceso que comunica el núcleo urbano de Palenzuela con la carretera nacional N-622.

La sección se ha realizado tratando de buscar una zona de río vadeable con cierto nivel de seguridad, pues la profundidad podía superar en muchos tramos anteriores el equipo y la altura de la persona que realizaba las mediciones.

Un tramo de río que en muchas ocasiones anteriormente superaba los 20 metros de anchura ampliamente, además contaba con una turbidez de las aguas que no permitía ver el fondo.

La velocidad de la sección ha sido la más baja de todos los tramos, con una media de 0,06 m/s. La profundidad media sin embargo ha sido la más alta, con 0,62 m. En este punto concretamente, la anchura de la sección es de 19 metros entre orilla y orilla.



Figura 19. Medición de la sección batimétrica del tramo 3 del estudio

Al circular con el instrumental dentro del río, se reconocía por las pisadas que el fondo del río se compone principalmente de rocas pequeñas y gravas con algo de arenas sedimentadas en las orillas.

La velocidad del agua era muy pequeña en casi todos los puntos. La vegetación era casi inexistente en el fondo, siendo un gran estrato de chopos, alisos y sauces los que componían la estructura vegetal de la ribera.

El acceso se realiza desde el talud de la margen derecha, pues donde se encontraba el camino agrícola que permite llegar hasta este emplazamiento. Los taludes son de tierra erosionada en la parte baja por la acción del agua que debido a la sequía permite ver hasta donde suele llegar la cota de la lámina de agua.

4.2.4 Tramo 4. Río Arlanza en el término municipal de Palenzuela (Palencia).

Tramo del río Arlanza aguas abajo desde el puente de acceso que comunica el núcleo urbano de la localidad de Palenzuela con la carretera nacional N-622. El emplazamiento de esta sección es unos metros aguas debajo de donde se ha realizado la sección del tramo 3.

La velocidad media de esta sección es mayor, resultando 0,25 m/s y una profundidad media de 0,40 m. Es de reseñar que la anchura se reduce hasta los 7,70 m.

En este punto, el río Arlanza se encaja en la parte de su cauce más profunda y estrecha, que se encuentra limítrofe a la margen derecha de la misma. Se accede

desde el camino agrícola que da servicio en la margen izquierda y se transita sobre un lecho de cantos hasta alcanzar el agua en esta sección.

Esta situación se puede deber a la excepcional sequía de este año hidrológico, que ha reducido la circulación del escaso caudal a las zonas más profundas de la cuenca.



Figura 20. Medición de la sección batimétrica del tramo 4 del estudio

En este tramo, el material del lecho se compone igualmente de cantos, con apenas vegetación en el fondo de la sección mojada. La vegetación de ribera se compone principalmente de alisos y distribuidos regularmente, que prácticamente somborean la totalidad del río en este punto debido a las anómalas condiciones de sequía.

En los taludes, y principalmente el derecho, se advierten signos de erosión; llegando a una altura de más de 1,2 metros por encima de la cota de la lámina de agua actual. Esta situación, cubriría el lecho de cantos por el que se ha accedido desde la margen izquierda.

4.2.5 Tramo 5. Río Carrión a su paso por la localidad de Villanueva del Río (Palencia).

Tramo del río Carrión que se encuentra más cercano al núcleo urbano de la localidad de Villanueva del Río. Se encuentra menos de 1 km al salir del pueblo por el camino agrícola más alejado de la carretera PP-9642 que da acceso al pueblo desde la carretera CL-615.

La anchura total es de 14,00 metros, con una profundidad media de 33 cm y una velocidad media de 0,73 m/s.

En este tramo del río Carrión, sólo se ha encontrado tramos vadeables, así que, por descarte, se ha optado por la localización más cercana desde el camino de acceso. Es un tramo en donde la pendiente del terreno acelera el flujo del agua.

Desde aquí, se ha circulado por una zona de cantos hasta el agua, la cual debido a la excepcional sequía de este año, se puede asegurar que forma parte del fondo del río en condiciones normales. Una vez introducido en el cauce, se confirma esta teoría al estar el fondo del río constituido por este mismo material. Excepcionalmente se ha encontrado algas o vegetación dentro de la corriente.



Figura 21. Medición de la sección batimétrica del tramo 5 del estudio.

En ambas márgenes existen plantaciones intensivas de populicultura, salpicadas en las orillas del cauce por algún sauce o aliso de manera espontánea. En la propia sección, un aliso sombreaba el cauce desde la margen derecha. El talud solo se encontraba en la parte del margen derecho con una altura de medio metro. Se observaban signos de erosión, pero debido a la zona y al caudal tan reducido que circulaba, es probable que ese talud sea mucho menor o incluso se pueda sobrepasar en un año hidrológico medio.

4.2.6 Tramo 6. Río Arlanzón a su paso por el término municipal de Palenzuela (Palencia)

Tramo del río Arlanzón que se encuentra 3 km aguas arriba de donde el río Arlanza se convierte en afluente de sus aguas.

La profundidad media de esta sección es de 0,34 metros, con una velocidad media de 0,47 m/s, siendo los valores más altos registrados en la parte central del cauce.

El tramo cuenta con un acceso de dificultad relativa por su margen izquierda, habiendo un gran talud que se ve interrumpido en algunas ocasiones por zonas acondicionadas para introducir el sistema de captación de agua para el bombeo y riego de algunas

parcelas agrícolas colindantes. En su margen derecha, se encuentra una densa masa de juncos de una anchura homogénea de dos metros hasta acceder al talud de esa orilla.

El lecho está formado por cantos predominantes y algo de gravas. Principalmente se compone de grandes bloques laminados de los estratos de roca caliza yesífera, que por la acción constante de la corriente se han vuelto resbaladizos. Ocasionalmente existe vegetación y algas en la parte remansada del flujo por las rocas. La velocidad del agua en este tramo es considerable e irregular a lo largo de la sección.



Figura 22. Medición de la sección batimétrica del tramo 6 del estudio.

El acceso a este tramo se realiza desde un camino agrícola que parte desde la carretera P-141 que comunica la localidad de Palenzuela con la autovía A-67 E-80. Para acceder al cauce ha de ser por el margen izquierdo, pues como se ha descrito anteriormente, por el derecho existe vegetación que lo impide. Los taludes son bastante verticales y ocasionados por la acción de la erosión, muy marcada y evidente en el tramo. Esta erosión deja ver en muchas ocasiones las raíces de los chopos y sauces que componen la vegetación ribereña.

4.3 Metodología

La metodología empleada en todos los tramos del estudio es la misma. Se procede inicialmente a comprobar que la sección del tramo seleccionado es vadeable en su totalidad, con objeto de evitar riesgo para la integridad física del operario.

Una vez confirmado este aspecto y con previo conocimiento de las Administraciones responsables del dominio público hidráulico de que se van a llevar a cabo una serie de

actividades de medición en el interior del cauce sin generar perturbaciones en el ecosistema, se iniciarán las actividades de medición.

Al realizar la toma de muestras, se empleará una metodología específica para cada instrumental utilizado, pues el proceso de medición es diferente en ambos casos.

4.3.1 Método Velocidad - Área.

4.3.1.1 Medición del Área

El telescopio (Figura 23) es un perfil metálico, recto y escalado con una precisión centimétrica que se emplea para la medida de la profundidad de la lámina de agua respecto del fondo. Para ello, el personal de campo, se introduce portando el telescopio perpendicular al plano de la lámina de agua en el cauce; y se desplaza hasta el punto donde se quiere obtener la información de la profundidad en ese lugar. La medición se realiza manteniendo vertical el instrumental en este punto de la sección, ayudado por un nivel de burbuja incorporado.



Figura 23. Telescopio Leica de 4 metros de longitud extensible utilizado para la medición de la altura de la lámina de agua respecto del lecho del cauce (Fuente: <http://www.gisiberica.com>).

La precisión es centimétrica, y la medida que ofrece es estrictamente puntual. Esta precisión depende de las condiciones en las que el operario pueda realizar las mediciones y la verticalidad que sea capaz de darle al telescopio en el momento de la medición. La existencia de perturbaciones superficiales como olas o espumas flotando, dificultan el obtener una medida exacta.

Estos datos de profundidad de cada punto serán anotados en un estadillo, como un único valor de ese punto de la sección transversal del río en donde se han realizado las mediciones.

Para conocer el punto donde se han de realizar las mediciones de profundidad, se mide el ancho mojado de la sección que queremos realizar. Esta anchura se mide mediante el anclaje de una cinta métrica en ambos extremos de la sección y conociendo cuál es la diferencia entre los valores de dicha cinta en ambos extremos.

Las recomendaciones de la ISO 748:2001 indican que es recomendable realizar un mínimo de 20 mediciones de profundidad en cada sección vadeable y susceptible de intensificar la presión de muestro de datos en función de la precisión que se pretenda obtener de la batimetría.

Cada una de estas mediciones de profundidad se realizará en verticales equidistantes, para lo cual se divide la anchura superficial en un número mínimo de 20 subsecciones.

4.3.1.2 Medida de la velocidad

En canales y cauces naturales, el flujo de agua es evidentemente tridimensional para cada punto de la corriente, por lo que el componente de velocidad tiene tres direcciones (X, Y, Z). Para hacer un análisis de esta velocidad, ha de poder componerse la curva de distribución de velocidades (Rocha A., 2007), como se muestra en la Figura 24.

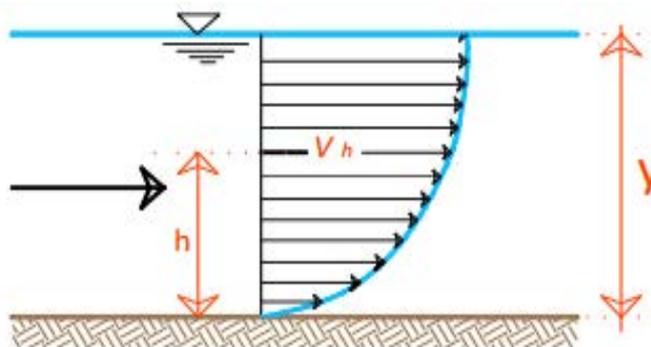


Figura 24. Distribución bidimensional de velocidades en un cauce natural de ancho infinito.

La velocidad del agua se registra por medio de un molinete hidráulico. El valor de esta velocidad es diferente a lo largo del eje vertical de una sección, siendo menor en las orillas y zonas cercanas a la superficie de la cuenca o a la lámina libre de agua.

El operario ha de introducirse en el cauce y desplazarse hasta el punto donde quiere realizar la medición portando el instrumental. Conocida la profundidad de este punto de la sección transversal del río, modificará la altura a la que se encuentra el molinete hidráulico dentro de la sección vertical.

Durante la medición, el operario ha de mantener el molinete enfrentado en todo momento a la dirección de la forma en que se registre el movimiento del flujo de agua de la manera más eficiente.

Ha de permanecer en esta posición el tiempo que sea preciso, hasta conseguir la estabilización del número de la medición.

Por ser un valor no homogéneo dentro de la misma vertical, y buscando en dato de la velocidad media que atraviesa este punto, se tomarán datos de la velocidad en diferentes alturas dentro de la vertical, siempre que el calado de la sección lo permita. Estos puntos son en 20, 40 y 80 % de la profundidad.

El tomar estos datos a estas alturas concretas, se debe a que existen las fórmulas que ajustan el dato de los valores de velocidad tomados a estas profundidades, con la velocidad media de la sección vertical en este punto, mediante un ajuste matemático sencillo.

- Si solo se puede realizar una única medida, se tomará al 40 % de profundidad medida respecto del fondo. La fórmula utilizada será:

$$V = V_{0.4}$$

- En caso de poder únicamente tomar dos medidas, serán al 20 y 80 % de la profundidad medida desde el fondo. La fórmula utilizada será:

$$V = 0,5 \cdot (V_{0.2} + V_{0.8})$$

- Si el calado lo permite, se harán las tres medidas, serán al 20, 40 y 80% de profundidad. La fórmula utilizada será:

$$V = 0,25 \cdot V_{0.2} + 0,5 \cdot V_{0.4} + 0,25 \cdot V_{0.8}$$

Los casos más favorables es tomar el máximo de puntos posibles por cada sección vertical, tratando de ser lo más precisos posibles y anotando el total de los decimales que ofrezca el instrumental del que se dispone.

Las limitaciones son impuestas en muchas ocasiones por el medio donde se mide. Los datos obtenidos se registrarán bien codificados en el estadiillo de campo.

Con estos dos instrumentos se recogen datos de los valores de velocidad y profundidad del caudal de puntos de la sección transversal de un cauce.

La cantidad de puntos donde realizar las mediciones de una sección determinarán la precisión con la que se monitoriza la sección, por lo que cuantos más puntos, mejor precisión.

Esta intensidad de muestreo dependerá de factores como la anchura del curso de agua, la accesibilidad dentro del cauce, la seguridad de los operarios, los recursos tanto económicos como de tiempo para intensificar las mediciones y la necesidad del proyecto a desarrollar.

El modelo de molinete hidráulico empleado, es el registrado bajo la denominación comercial Swoffer Model 2100 Current Velocity Meter (Figura 25). Su rango de operación es de 0,03 a 7,5 m/s en cuanto a registro de velocidades según el manual técnico.



Figura 25. Molinete hidráulico Swoffer Model 2100 utilizado para realizar las medidas de velocidad del caudal que circula por cada tramo de estudio.

Según Boiten (2003), este tipo de instrumental precisa de un periodo de medición de la velocidad igual o superior a 30 segundos, para realizar una medida óptima y estable debido a las continuas irregularidades y variaciones instantáneas de un flujo hidráulico en un cauce natural.

4.3.2 Metodología del Perfilador Acústico.

Las especificaciones técnicas del perfilador acústico son básicas, no exhaustivas; al encontrarse este sistema en proceso de patente del prototipo. Esta postura, está enfocada únicamente a preservar la confidencialidad del diseño y del instrumental que lo compone.

A continuación se realiza una breve descripción la metodología que sigue el perfilador para la toma de los datos en los cauces, así como una descripción más detallada del proceso por el cuál, el instrumental que equipa el perfilador, realiza las mediciones y registro de la información del cauce.

Este prototipo, cuenta con un sistema de propulsión y dirección por radio control, que no implica la necesidad de introducir a ningún operario dentro de la corriente del río para llevar a cabo las mediciones.

Desde la orilla se sitúa el perfilador en el cauce y se conecta la alimentación eléctrica del propulsor y el instrumental de medición. Por medio de la emisora de radio control que portará el operario desde la orilla y con una buena visibilidad, este guiará el perfilador por el cauce a lo largo de la sección transversal requerida.

4.3.2.1 Medida del área de la sección.

El perfilador equipa una serie de sensores acústicos que van introducidos en el cauce y que monitorizan la profundidad a la que se encuentra el lecho del cauce. Este sistema registra la propagación de ondas acústicas a lo largo del fluido como es el agua.

Los sensores que equipa son transductores piezoeléctricos que trabajan a una frecuencia de 40 KHz, impermeabilizadas las conexiones para evitar derivaciones eléctricas y encapsulados para evitar el contacto directo de las piezas mecánico-eléctricas con en agua.

Su funcionamiento se basa en la oscilación de un material piezoeléctrico por medio de una estimulación procedente de un pulso de tensión emitido desde el circuito controlador.

Esta energía eléctrica se traduce en energía mecánica y produce una oscilación de dichos materiales, emitiendo esta oscilación un haz de ondas a una frecuencia de 40 KHz y enfocado con un ángulo de 15° de apertura por la construcción del sistema de encapsulado.

Esta onda se propaga por un medio como es el agua, hasta encontrar un elemento que tenga mayor densidad e impida su propagación, que en el caso de estudio que nos ocupa, es el material orgánico o inorgánico que compone la estructura del lecho del río.

En este momento en el que la onda impacta contra el lecho del cauce, una pequeña parte de la onda es amortiguada por el medio, pero prácticamente su totalidad rebota en el mismo con la misma dirección, pero en sentido opuesto a la propagación desde el transductor emisor.

En ese momento la onda recorre la misma distancia desde el emisor hasta el fondo, pero en sentido opuesto. Junto al emisor, hay instalado otro transductor piezoeléctrico que realiza la operación inversa al emisor, convirtiéndose en receptor.

El receptor, como su propio nombre indica, recibe el haz de ondas rebotado desde el fondo del cauce, permitiendo que estas ondas hagan oscilar el material piezoeléctrico que compone el transductor.

Esta oscilación mecánica se traduce en un pulso eléctrico que se recoge por parte del sistema electrónico y queda registrado en el programa.

Conociendo el tipo de onda que se ha emitido, el medio sobre el que se propaga y el tiempo que ha tardado desde que se ha registrado la emisión y la recepción de los pulsos, podemos conocer la distancia.

Sabiendo que la velocidad es el producto de la distancia recorrida por unidad de tiempo, donde C es la velocidad, D es la distancia y T es el tiempo; organizamos la ecuación para que sea la distancia la variable a conocer.

$$C = D \cdot T \qquad D = \frac{C}{T}$$

La velocidad de propagación de una onda en un fluido se expresa por:

$$C = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

Dónde:

C es la velocidad de propagación de la onda dentro de un fluido.

ρ es la densidad del medio por el que se propaga.

K es la constante de compresibilidad del fluido ($2,2 \cdot 10^9$ Pa).

La densidad del agua varía en función de la temperatura, parámetro que se controla con otro sensor incorporado en el perfilador, monitorizando en todo momento la temperatura a la que se encuentra el agua.

Aplicando una regresión polinómica de orden 3 a los datos de la densidad en función de la temperatura del agua a la presión de una atmósfera, se obtiene la función que se indica a continuación en la Figura 26.

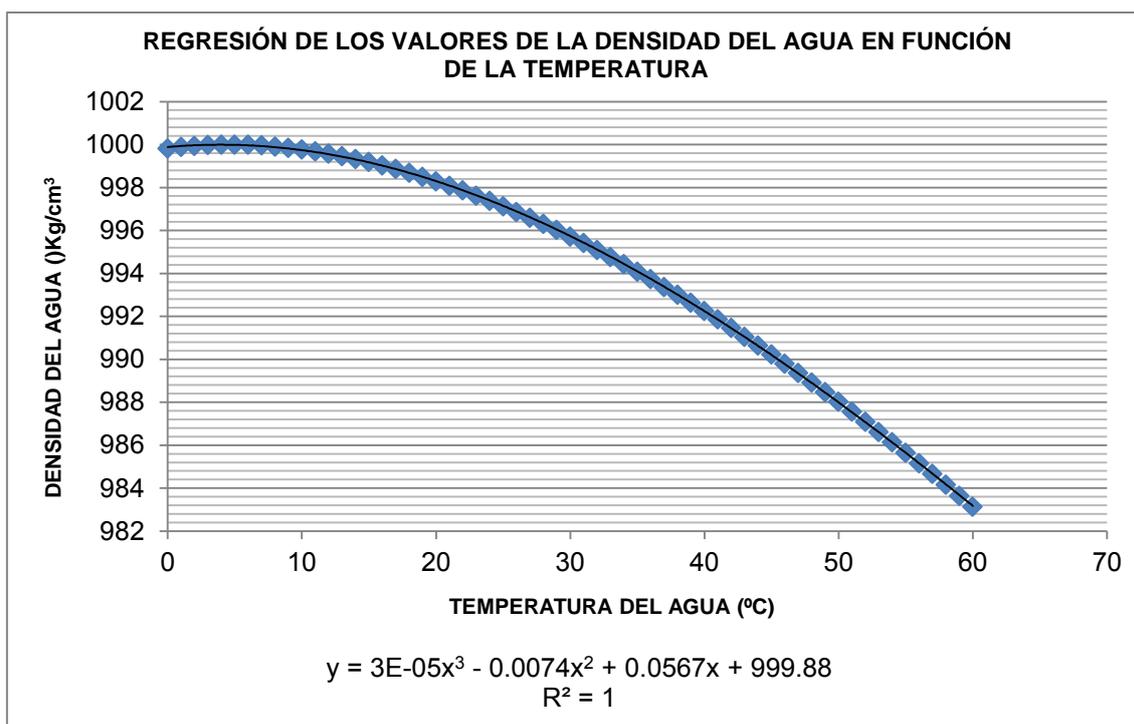


Figura 26. Variación de la densidad del agua en función de la temperatura.

Introduciendo el valor registrado por el sensor de temperatura en la ecuación de la regresión polinómica de la densidad, obtenemos la velocidad de propagación de una onda dentro del agua de este cauce.

Desde el procesador, se monitoriza la diferencia entre el tiempo que ha tardado la onda en dar un pulso eléctrico a la salida del emisor y al registrar la oscilación del rebote de la onda en el sensor receptor.

Teniendo los valores de tiempo y velocidad, el valor de la distancia resulta del cociente de esta velocidad entre el tiempo registrado como se ha mostrado en la ecuación anteriormente.

La anchura de la sección se registra por medio de la diferencia de los puntos inicial y final del sistema de posicionamiento global (GPS) que incorpora el perfilador. Como la precisión aún no es la óptima debido a las limitaciones económicas en la adquisición de un instrumental de mayor precisión, se aprovecha la medida de anchura realizada con la cinta métrica de una orilla a otra.

Teniendo el valor de la anchura y los valores de profundidad registrados, se realizará el cálculo del área de la sección de manera homóloga a la expuesta en la metodología Velocidad – Área.

4.3.2.2 *Medida de la velocidad.*

La velocidad la registra por medio de un molinete hidráulico portátil que se puede mover a lo largo de su eje vertical para introducirlo en mayor o menor medida dentro del río. Este ajuste es mecánico y se realiza antes de iniciar las mediciones. El parámetro para realizar este ajuste es el estado de la lámina superficial de agua.

El molinete consta de una hélice que se enfrenta al flujo de la corriente y hace girar el eje de un generador eléctrico monofásico de 0,02 V a 5 V de tensión. En función de diferencia de potencial establecida entre los bornes del generador eléctrico, se pueden conocer las vueltas que ha tenido que dar el bobinado para inducir esta tensión un periodo de tiempo establecido y obtener las revoluciones por minuto (rpm), como se muestra en la ecuación a continuación:

$$RPM = 1000 \frac{(C \cdot 60)}{P}$$

Dónde:

RPM son las revoluciones por minuto del molinete.

C es el contador de la diferencia de tensión establecida.

P es el intervalo de tiempo establecido durante el que se monitoriza el inicio y el final de la medición de las RPM.

Una vez que controlamos la constante de la superficie sobre la que actúa la corriente y conocemos las revoluciones por minuto que es capaz de accionar dicha corriente por medio de la inducción de una diferencia de potencial; establecemos la relación de la velocidad a la que circula el agua por el cauce en las unidades de m/s. la ecuación con la que se ha realizado la conversión de revoluciones por minuto a velocidad de la corriente, se indica a continuación.

$$V_s = 1000 \frac{4\pi \cdot r \cdot RPM}{60} \cdot 3,6$$

Dónde:

Vs es la velocidad superficial de la corriente (m/s)

r es el radio de la hélice del molinete (mm).

RPM son las revoluciones por minuto calculadas anteriormente.

Esta medida como se ha descrito al principio del apartado, es la velocidad superficial del cauce, pudiendo regular la posición del sensor al inicio de la medición de manera mecánica en el alojamiento del perfilador acústico.

La medición de las velocidades en la superficie ofrece un margen de error máximo de un 10% (Lee et al, 2002) y conociendo la reducida inercia mecánica del instrumental durante la medición de velocidades en la fase de calibración y viendo el rango de velocidades y calados en los que se trabaja; se ha prescindido de realizar un ajuste matemático de la distribución de la curva de velocidades a lo largo de la sección longitudinal del cauce.

4.3.2.3 Otras funciones importantes del perfilador acústico

Cada uno de estos datos procedentes de la medida de parámetros del río y del cauce como son la profundidad, velocidad de la corriente y la temperatura; van georreferenciados por medio de un sistema de posicionamiento global (GPS) que incorpora el propio perfilador acústico.

Asocia a la salida de la medición el valor de la medida del cauce con el valor de longitud, latitud y altitud en el sistema de proyección cartográfico *European Terrestrial Reference System 1989* (ETRS 89).

Por último, se prescinde de estadillos de campo, pues todos los datos generados de las mediciones de profundidad, velocidad, temperatura y georreferenciación se almacenan automáticamente en un soporte físico de almacenamiento de datos informáticos como es una tarjeta de memoria flash micro SD.

El formato de lectura de estos datos es mediante un archivo *.txt* que es compatible con cualquier soporte informático para trabajar con ellos.

La precisión del instrumental es centimétrico para los sensores de profundidad, velocidad y temperatura, no así el sistema GPS; que solo ofrece, tras la calibración posterior realizada, un margen de error cercano al metro.

Mencionar que la propulsión y dirección del perfilador acústico durante su circulación en el interior del cauce se realiza mediante un equipo de radio control. De esta forma, el operario controla los movimientos del perfilador acústico desde una emisora de radio control como la que se muestra en la Figura 27.



Figura 27. Emisora Futaba FF7 t7cap a 35 MHz con la que se controla el desplazamiento del perfilador acústico dentro del cauce desde la orilla.

Esto hace totalmente prescindible que el operario que realice las mediciones se introduzca en el interior del cauce, contando con un diseño de propulsión que tampoco resulta agresivo e intrusivo para el ecosistema fluvial.

5 Resultados

5.1 Comparativa Económica

La inversión inicial en la adquisición de instrumental tanto para labores de investigación, como para el desarrollo de una actividad profesional; es un factor limitante en cuanto a la ejecución de este tipo de trabajos.

A continuación, se ha realizado un desglose no pormenorizado del instrumental y equipo necesario con el que se han llevado a cabo las mediciones comparativas de estas dos metodologías en las que se centra el presente estudio.

5.1.1 Coste del instrumental de la metodología velocidad-área.

Para la metodología de área-velocidad, se ha empleado un equipo de campo, como el que se indica a continuación en la Tabla 2 la relación de precios de este equipo, que ha sido cedido por la Universidad de Valladolid.

Tabla 2. Precios del instrumental empleado para ejecutar batimetrías por la metodología de área-velocidad.

Instrumental	Precio	Dirección
Molinete hidráulico SW-2100.	2.428,00 €	http://www.ereinc.com/Browse/Product/925/69/Swoffer-Model-2100-Series--3000-Series
Telescopio Leica 4 m.	99,17 €	http://www.gisiberica.com/telescometros.pdf
Cinta métrica de 50 m.	13,35 €	https://www.trendingfit.com/medicion-hinchado-y-otros/1381-cinta-metrica-50-m.html
Vadeador impermeable.	34,99 €	https://www.decathlon.es/vadeador-de-pesca-pvc-caperlan-start-id_8083983.html

El total de la inversión necesaria en la adquisición del instrumental para realizar batimetrías por el método área-velocidad con los medios disponibles, ha supuesto un desembolso de 2.575,51 €.

5.1.2 Coste del instrumental del perfilador acústico

El perfilador acústico, ha sido diseñado, construido y calibrado por el firmante del presente estudio. El desglose no pormenorizado de los materiales empleados para su construcción en grupos homogéneos de componentes funcionales, se indica en la Tabla 3 a continuación.

Tabla 3. Relación de la inversión en materiales para la construcción del perfilador acústico.

Instrumental	Precio
Marco estructural principal de aluminio.	64,85 €
Pontones flotadores desmontables.	29,63 €
Sistema de propulsión y dirección eléctrico.	148,00 €
Caja impermeable de protección de la electrónica.	24,00 €
Sistema de radio control emisora-receptor.	130,00 €
Sensores, procesadores y electrónica general.	96,84 €
Alimentación de 3 baterías LiPo 5.200 mAh intercambiables.	91,35 €

El total de la inversión necesaria en la adquisición de los materiales para construir el perfilador acústico con el que se ha realizado este estudio comparativo, ha supuesto un desembolso en materiales de 584,67 €

5.1.3 Desempeño del perfilador acústico

Debido a la agilidad en la toma de datos que confiere el perfilador acústico respecto de la metodología de velocidad-área, se realizaron 4 repeticiones de la medida de cada una de las secciones de los diferentes tramos con dicho perfilador acústico. Se muestra la variación de las medidas de manera gráfica en la Figura 28.

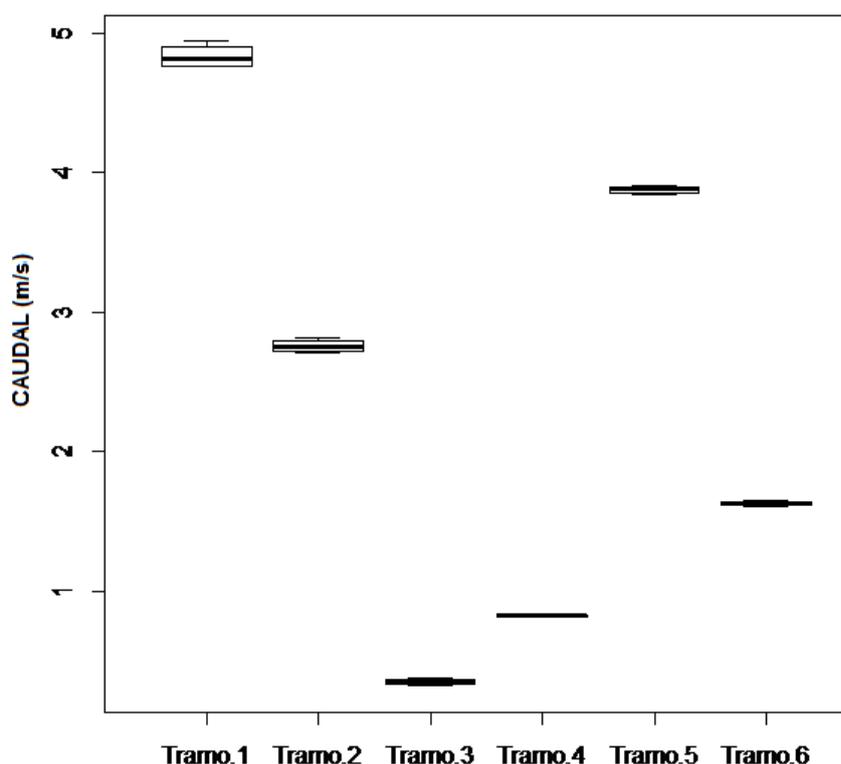


Figura 28. Gráfico de cajas de las variaciones de las mediciones realizadas por repetición con el perfilador acústico.

En la Tabla 4 a continuación se muestran los valores calculados de caudal en cada una las 4 repeticiones.

Tabla 4. Valores de caudal calculados con el perfilador acústico en las 4 repeticiones realizadas.

	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6
Medición 1	4,77	2,78	0,32	0,83	3,87	1,61
Medición 2	4,94	2,74	0,35	0,81	3,91	1,64
Medición 3	4,87	2,71	0,34	0,83	3,90	1,62
Medición 4	4,77	2,82	0,37	0,81	3,84	1,65

Más allá de la precisión que pueda ofrecer el instrumental, este gráfico muestra que la variación entre las mediciones son muy pequeñas, por lo que se advierte una homogeneidad y regularidad en el comportamiento y el funcionamiento del instrumental en el perfilador.

5.1.4 Tiempo de medición

Parte de la eficiencia de un trabajo de batimetría es el factor del tiempo necesario para realizar las correspondientes mediciones de los parámetros del cauce. En este estudio se ha cronometrado desde el inicio de las actividades de medición hasta la recogida del instrumental, el tiempo que se ha invertido en las diferentes metodologías, mostrándose en la Tabla 5.

Tabla 5. Tiempo invertido en la toma de datos de campo de las dos metodologías.

	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6
Tiempo V- A (min)	74	17	68	94	89	77
Tiempo Perf. Ac. (min)	40	11	37	48	52	49
Variación (min)	34	8	31	46	37	28
% Var.	85 %	72 %	84 %	96 %	71 %	57 %

Las condiciones de cada cauce de agua son excepcionales y únicas, no solo en cuanto al cauce, sino dentro de un periodo de tiempo como pueda ser a lo largo de un año con la sucesión de las diferentes estaciones y los fenómenos bióticos o abióticos que puedan influir.

Estas situaciones cambiantes pueden influir en posteriores mediciones, pero durante el estudio, se han sucedido ambas metodologías en la misma sección. Además de las mismas condiciones, mencionar que estas han sido favorables en todo momento, no recibiendo perturbaciones por fenómenos ambientales tales como viento, precipitaciones, etc.

En cuanto a los tramos inventariados y a las condiciones en las que se han realizado las mediciones; se muestra un valor medio de mejora en la inversión de tiempo del 77,50 % con el perfilador acústico respecto de la metodología de velocidad-área.

5.1.5 Comparativa entre las metodologías

5.1.5.1 Medición de las áreas

El área es una medición que precisa de una serie de variables mejor monitorizadas en ambas metodologías como muestran los datos de las áreas calculadas de cada sección en la Tabla 6.

Tabla 6. Registros de área mojada en los distintos tramos con ambas metodologías.

	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6
Área Á-V (m ²)	7,23	4,80	12,14	3,19	4,68	2,66
Área Perf. Ac. (m ²)	7,07	4,80	11,76	3,01	4,61	2,68
Variación (m ²)	0,16	0,00	0,38	0,18	0,07	0,02
% Var.	2,18	0,00	3,15	5,74	1,40	0,75

El porcentaje total de variación es de 2,21 % entre una metodología y otra para la medición de la variable de área de las secciones realizadas.

Se aprecia que las medidas del área en el tramo 2 coinciden con ambas metodologías. Esto es debido a que el Tramo 2 del estudio es canal de riego con una sección antropizada un perfil geométrico regular y homogéneo respecto a la lámina de agua.

Esta situación resulta favorable para el proceso de medición de este parámetro en ambas metodologías, siendo un tramo de control en el presente estudio, debido a la

En el resto de las mediciones, todos los tramos arrojan valores superiores del área con la medición mediante la metodología velocidad-área, salvo en el tramo 6.

El rango de diferencias en porcentaje de medición de área se encuentra entre un valor de error mínimo de 0,0 % y un 5,74 % de error máximo.

5.1.5.2 Medición de las velocidades

La velocidad es el parámetro que más ha variado en comparación con el área de la sección. Resulta más complicado y tedioso de monitorizar debido a contar con un instrumental que registra la acción del flujo sobre dicha herramienta, teniendo una serie de variables como la posición, la construcción del sensor y el rango de velocidades que influyen enormemente en las medidas.

Esta acción del agua nunca es constante y en muchas ocasiones se ha encontrado en rangos difíciles para el instrumental. En la Tabla 7 se muestran los valores.

Tabla 7. Variación de la medida de las velocidades en función de las mediciones en cada tramo.

	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6
Velocidad V-A (m ²)	0,56	0,55	0,04	0,28	0,76	0,49
Velocidad Perf. Ac. (m ²)	0,68	0,57	0,03	0,27	0,84	0,61
Variación (m ²)	0,12	0,02	0,01	0,01	0,08	0,12
% Var.	21,51	4,11	24,95	2,05	10,84	23,51

Como se puede apreciar, es el valor que más variación tiene entre una metodología y otra, con un valor porcentual medio de 14,50 %.

5.1.5.3 Medición de los caudales

Los caudales son diferentes entre sí. Comparando la medición realizada con los instrumentales de cada una de las metodologías, obtenemos la información de los caudales en la Tabla 8.

Tabla 8. Variación de la medida de los caudales en función de las mediciones por cada tramo.

	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6
Caudal V-A (m ³ /s)	4,07	2,65	0,50	0,85	3,54	1,31
Caudal Perf. Ac. (m ³ /s)	4,83	2,76	0,39	0,82	3,87	1,623
Variación (m ³ /s)	0,77	0,11	0,11	0,03	0,33	0,32
% Var.	15,87	3,94	22,50	3,81	8,49	19,64

La variación media entre una metodología y la otra es de un 12,38 % del valor medio de los caudales aforados en los 6 tramos vadeables de los ríos y canales de la región de estudio. En la Figura 29 se representa esta variación con un gráfico de cajas en donde se puede apreciar esta fluctuación de datos.

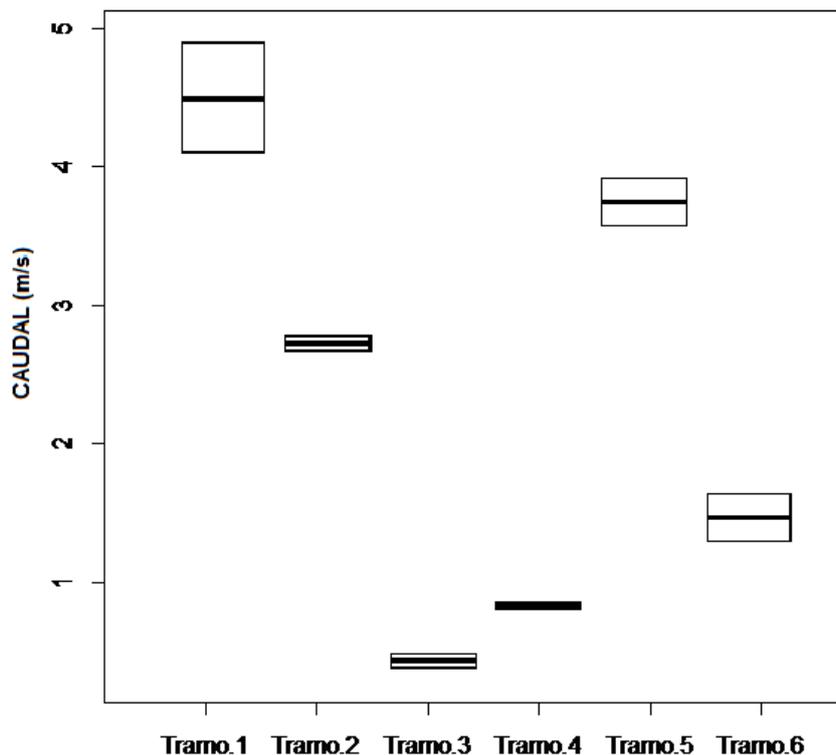


Figura 29. Gráfico de cajas que representa la variación de los valores de caudal calculados con las dos metodologías

Se deduce que esta fluctuación en los valores de caudal es fruto de la variación registrada entre los valores medios de velocidad medidos en ambos sistemas que diferían mayor grado que la medición del área.

5.2 Conclusiones

Los hallazgos encontrados en seis sitios de ensayo reflejan que el levantamiento hidrotopográfico de cauces naturales vadeables mediante el perfilador acústico resulta más competitivo que el método de velocidad-área cuando se atiende a los criterios económicos y de tiempo de medición.

- En cuanto al desempeño para medir la variable área mojada, nuestros resultados indican que la precisión de ambas metodologías es comparable.
- En cuanto a la medición de la velocidad, los registros con el perfilador acústico difieren notablemente del método velocidad-área. En tramos con velocidades bajas, el comportamiento del sensor de velocidad del perfilador mantiene cierta inercia del desplazamiento del prototipo.

- Durante los ensayos de calibración, el sensor de velocidad del perfilador funciona mejor cuanto mayor son las velocidades que ha de registrar. En las condiciones naturales de este estudio, esta diferencia no se ha percibido de manera notable.
- Teniendo en cuenta que la precisión ordinaria del molinete hidráulico es del 5% hasta el 10%, este es un aspecto mejorable del perfilador acústico que será perfeccionado en futuras versiones.
- La inversión inicial en la adquisición del instrumental resulta favorable para el perfilador acústico en cuanto a la compra de los materiales. La fase de construcción y calibración involucra un tiempo cuyo coste económico no ha sido estimado en este trabajo académico.
- Atendiendo a la variable de tiempo para realizar las mediciones, el perfilador acústico se muestra claramente más competitivo que el método velocidad-área. En los sitios estudiados el equipo acústico es capaz de realizar cuatro (4) levantamientos de una sección transversal (repeticiones) en el tiempo que con el método velocidad-área se levanta un único perfil topográfico.
- El perfilador acústico registra un comportamiento homogéneo y regularidad en los datos de mediciones sucesivas.
- También en cuanto a la prevención de riesgos para el personal de campo, el perfilador resulta más solvente que el esquema clásico de velocidad-área. Al no requerir que los operarios se introduzcan en el agua, el equipo acústico evita riesgo derivados de eventuales asociados a:
 - Caídas, resbalones, tropiezos, etc. dentro del cauce.
 - Desplazamiento dentro de un entorno con reducida visibilidad.
 - Desconocimiento del relieve del fondo.
 - Atrapamientos por ramas o piedras.
 - Hipotermia (no en las condiciones de los tramos de estudio).
 - Entumecimiento, cansancio, fatiga muscular por portar el instrumental.
 - Insolación, deshidratación y quemaduras.
 - Contacto con vertidos, agentes contaminantes, enfermedades.
 - Mareos.
- El perfilador acústico ha sido diseñado para minimizar la perturbación del medio acuático (hidráulico y hábitat), al no ser intrusivo dentro del cauce para su propulsión y deslizarse por la superficie del agua introduciendo únicamente los sensores.

6 Bibliografía

ALDANA VALVERDE, A.L., (2002). *“Métodos de estimación de relaciones nivel caudal. Aplicación en los sistemas en tiempo real”*. Jornadas sobre sistemas de ayuda a la decisión ante problemas hidráulicos e hidrológicos en tiempo real. CEDEX. Madrid.

BJERJLIE, D.M., DINGMAN, S.L., VOROSMARTY, C.J. & BOLSTER, C.H. (2003). *“Evaluating the potential for measuring river discharge from space”*. Journal of Hydrology 278. p 17-38.

BOITEN, W. (2003). *Hydrometry*. Netherlands: Swets & Zeitlinger.

CHENG, R.T. (2000). *“Defining hydrology instrumentation for the 21st century”* Scientific Investigations. U.S. Geological Survey.

HELMBRECHT, J. et al. (2004) *“Cálculo de incertidumbres en la medida de caudales en ríos y canales: herramientas y aplicaciones prácticas innovadoras”*. Realizado para Agència Catalana de l' Aigua.

HERSCHY, R.W. (1978) *Hydrometry. Principles and Practices*. John Wiley & sons.

HUDSON, N.W. (1997). “Capítulo 4 – Caudal” en HUDSON, N.W. *Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la Escorrentía*. Reino Unido. Boletín de Suelos de la FAO. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/T0848S/t0848s06.htm>

MARINUS G.B., REPLOGLE J.A. & CLEMMENS A.J. (1986) *“Aforadores de caudal para canales abiertos”*. Traductores: Ortiz Fernández-Urrutia J.A. & Martínez Beltrán J. Publicación Nº 38. p 11-18.

MARTÍNEZ DE AZAGRA, A. (1990) *Problemas prácticos de hidráulica forestal*. Palencia. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias

MELCHER, N.B., COSTA, J.E., HAENI, F.P., CHENG, R.T. & THURMAN, E.M. (2002). *“River discharge measurements by using helicopter-mounted radar”*. Geophys. Res. Lett. 29, 2084.

MELTCALF & EDDY, INC (1995). *Ingeniería de aguas residuales*. Mc Graw Hill.

MORENO, M. L. (2010). *“Técnicas y algoritmos empleados en estudios hidrológicos e hidráulicos”*. Servicio de aforos y estadística de la Confederación Hidrográfica del Ebro.

MUSTE, M., KIM, W., FULFORD, J.M., (2008). *“Desarrollo de la tecnología hidrométrica: Instrumentos nuevos y emergentes para trazar los mapas de las condiciones hidrodinámicas de los ríos”*. Boletín de la Organización Meteorológica Mundial 57, p 163-169.

ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL, (1994). “*Guía de Prácticas Hidrológicas*”. 5ª Edición. O.M.M. N°168.

PLANT, W.J., KELLER, W.C. & HAYES, K. (2005). “*Measurement of river Surface currentes with coherent microwave systems*”. Geoscience and Remote Sasing, IEEE 43. p 1242-1257.

PARSHALL, R.L. (1950) *Measuring water in irrigation channels with Parshall flumes and small weirs*. Circular 843, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Servicio de Conservación de Suelos, Washington DC.

SONTEK, (2000). “*Doppler Velocity log for ROV/UAV applications*”, SonTeck INC. California. USA.

TELEDYNE RD INSTRUMENTS (2008). *Stream PRO Acoustic Doppler Current Profilers. Operation Manual*. Teledyne INC. California. USA.

TIPLER, P.A. & MOSCA, G. (2010) *Física para la ciencia y la tecnología, Vol. 1: Mecánica, oscilaciones y ondas, termodinámica*, 6ª Edición. Editorial Reverté.

UNE-EN ISO748 (2001) “Medida de caudal de líquidos en canales abiertos. Métodos de exploración del campo de las velocidades” (AENOR) de acuerdo a la ISO 748: 1997.

DIRECCIONES WEB:

CNULD. (Convención de las Naciones Unidas para la Lucha Contra la Desertificación).

<http://unddd.unccd.int>

Miliarium.com Tabla de propiedades físicas del agua.

<http://www.miliarium.com/Paginas/Prontu/Tablas/Aguas/PropiedadesFisicasAgua.htm>

Steam Pro ADCP Operation Manual.

<http://www.rdinstruments.com/smartlink/sp/index.shtml>

Swoffer Instruments INC. Model 2100 Series Current Velocity Meters.

<http://www.swoffer.com/pdf/2100pdf/indicator16.pdf>

MEMORIA

Anejo 7.1.: Descripción de las secciones de los Tramos

7 Descripción de las secciones de los tramos

7.1 Tramo 1. Río Pisuerga.

Este tramo del estudio pertenece a una sección del río Pisuerga a su paso por el término municipal de Cordovilla la Real al sur de la provincia de Palencia. Bajo el sistema de proyección cartográfica ETRS 89 UTM 30 N, se encuentra localizado en las coordenadas X 395.032,23 y 4.659.432,48 de coordenadas Y.



Figura 30. Fotografía de los trabajos de medición en la sección del tramo 1.

La sección batimétrica tiene un valor de 0,42 metros de profundidad sobre la lámina de agua y una velocidad media registrada de 0,51 m/s. En la Figura 31 se muestra la sección en cuanto a los valores de profundidad y velocidad medidos en cada uno de los puntos del muestreo.

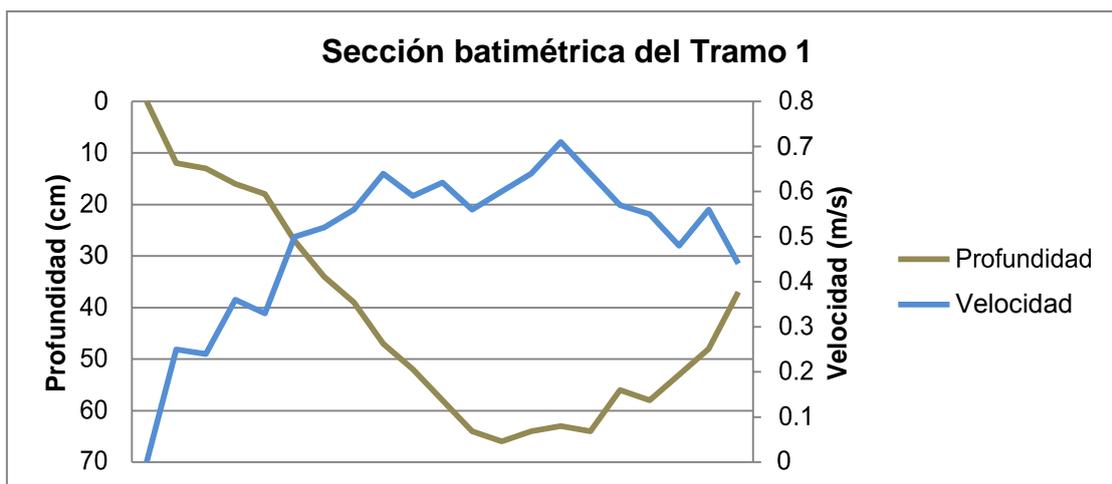


Figura 31. Sección batimétrica del tramo 1.

La característica principal para escoger esta sección de río se debe a la progresión de la profundidad desde la margen derecha hasta la zona cercana al centro de la sección.

Esta progresión de la profundidad resulta interesante para el estudio, debido a la continuidad de la orilla. De esta manera, en la sección se observa el comportamiento del instrumental en una situación en la que la distancia y la velocidad disminuyen de una manera tan progresiva y semejante en ambos parámetros.

Conociendo que existe esta progresión en los valores del medio, se trata de apreciar la inercia en el instrumental durante el proceso de medición.

La composición de la sección es de un lecho de gravas y arenas en las zonas cercanas a las orillas donde la menor velocidad de la corriente ha propiciado que se puedan depositar, mientras que la parte central de la sección se compone de rocas de medio tamaño.

La existencia de vegetación en el interior del cauce es prácticamente inexistente.

7.2 Tramo 2. Canal de Villalaco.

Este canal de riego que se abastece de las aguas del Pisuerga para dar agua a los campos de las explotaciones agrícolas de los municipios colindantes a la localidad de Torquemada, es una canalización abierta de hormigón con una sección rectangular.

Por facilidad de acceso, se ha optado por realizar la sección de estudio en las coordenadas X 395.098,82 y 4.661.166,62 Y. El sistema de proyección cartográfica es el mismo para todos los tramos, y sitúa esta localización a orillas de la carretera P-412 entre los términos municipales de Torquemada y Villalaco.

Esta conducción tiene una profundidad media de 1,2 metros, que coincide con la altura máxima de apertura de las compuertas de regulación. La velocidad medida como valor medio registra 0,55 m/s.

Esta sección ha sido escogida por ser una canalización de agua de origen antrópico, diseñada para transportar un gran volumen de agua entre dos puntos de manera no natural y suministrando un volumen de agua constante con cierta relevancia.

Es una construcción de un perfil hormigonado del que se conoce la sección y sus dimensiones perfectamente. La regularidad de la sección es un reto para ver la fiabilidad del instrumental.



Figura 32. Fotografía de los trabajos de medición en el tramo 2.

Se han podido realizar las mediciones con el telemetro como se aprecia en la Figura 31 y con el molinete gracias a situar la sección de estudio antes de una compuerta de regulación del caudal. La anchura de 4 metros es vadeable desde una pasarela de hormigón integrada en el sistema de regulación de compuertas manuales.

Desde esta plataforma se ha podido introducir el instrumental en el flujo de agua en los diferentes puntos de la sección, debido a que no resultaba viable introducirse un operario en el canal para realizar las mediciones, obteniendo así la sección batimétrica del tramo (Figura 33).

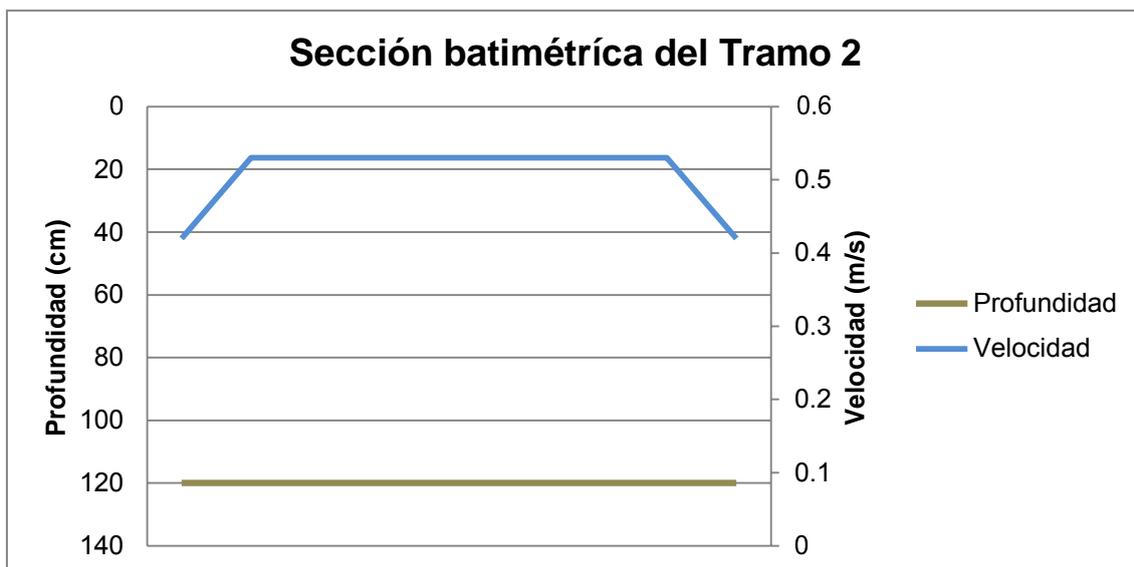


Figura 33. Sección batimétrica del tramo 2.

La lámina de agua se encontraba a una cota constante de 1,2 metros sobre el fondo del canal. Esto resulta un nivel de agua que roza la altura de los hombros del operario, por lo que por seguridad, en ningún momento se ha sopesado la posibilidad de introducirse dentro de la canalización de agua para realizar las mediciones.

La velocidad del agua a lo largo de la sección es uniforme en la parte central debido al valor de la anchura y registra. Una disminución prácticamente simétrica a medida que nos acercamos a los bordes de la sección, debido a la fricción del agua con el material que compone la estructura de la canalización.

Como la finalidad del canal es conducir el mayor caudal de agua posible de la manera más eficiente, las paredes de la sección tienen la menor rugosidad posible. No se han observado elementos que produzcan alteraciones en el cauce tras la inspección visual desde los márgenes.

7.3 Tramo 3. Tramo 3. Río Arlanza.

Este tramo de estudio se encuentra cercano al núcleo urbano del pueblo de Palenzuela al sureste de la provincia de Palencia. La localización más exacta de este tramo corresponde a las coordenadas 404.842,18 para X y 4.660,745,53 para coordenadas Y (Figura 34).



Figura 34. Fotografía de los procesos de medición en el tramo 3.

En esta sección, la profundidad en donde ha habido que introducirse con el vadeador y portando el instrumental de medición como el molinete hidráulico y el telescopio; ha sido la mayor registrada frente al resto de tramos del estudio, superando en algún punto los 90 cm.

7.4 Tramo 4. Río Arlanza.

La sección de estudio del tramo 4 es sobre el mismo río Arlanza dentro del mismo término municipal de Palenzuela, pero unos cuantos metros aguas abajo del tramo 3 del presente estudio. La localización exacta se encuentra en las coordenadas 404.899,37 del eje X y 4.660.725,31 para el eje Y.

El valor de la velocidad media en esta sección es de 0,25 m/s. La profundidad media es de 0,40 m y resulta bastante homogénea a lo largo de la sección. Reseñar que en esta ocasión, la anchura solo era de 7,70 m (Figura 34).



Figura 36. Fotografía de los procesos de medición en el tramo 4.

Debido a la excepcional sequía sufrida durante este año, el cauce de los río se ha reducido en prácticamente todas las cuencas peninsulares hacia sus cotas más bajas dentro de la cuenca, debido a la disponibilidad de agua embalsada.

Este es un claro ejemplo, y no el único del estudio, en donde el paisaje indica por fenómenos como la acumulación de gravas, la erosión de las orillas y la línea de inicio de la vegetación de ribera, entre otros; que el caudal del río en condiciones normales no es el que encontramos este año.

Como se puede ver en la sección batimétrica en la Figura 37, todo el caudal circula por un tramo de 7,70 metros en la zona más deprimida del terreno, en donde se ha encauzado en una sección homogénea y de un ancho estrecho.

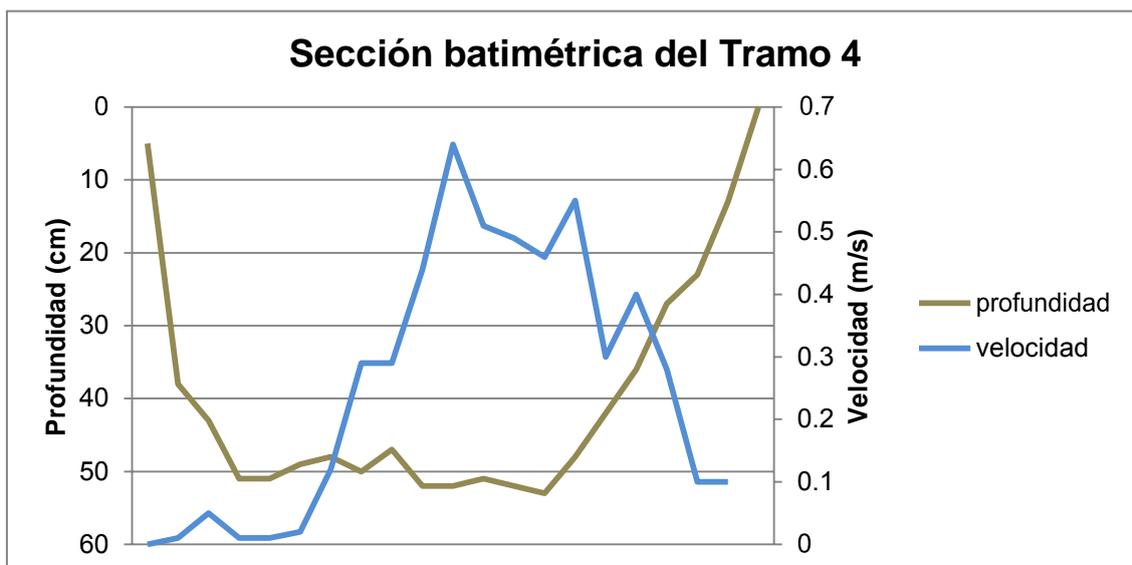


Figura 37. Sección batimétrica del tramo 4.

La velocidad experimenta un incremento en la parte central de la sección, pero a partir de la mitad de la anchura, teniendo la misma profundidad en ambos puntos.

Esto es debido a una circunstancia hidráulica excepcional que no se ve reflejada en la propia sección, pero que la afecta de manera directa en la toma de los datos.

En este lugar se origina un remanso por la morfología del talud de la orilla, generando una zona en la que la acción de la velocidad aguas arriba de la sección se ve interrumpida por este elemento estructural.

La sección ha sido elegida como una situación en la que poder ver el comportamiento de este fenómeno hidráulico de los remansos, que afectan a las mediciones y en qué grado se registraba su efecto en los datos de la batimetría.

Como se ha mencionado, las gravas y cantos depositados en la orilla también forman parte del lecho del cauce. La vegetación, al igual que en el tramo 3, se compone de alisos y sauces en ambas orillas.

7.5 Tramo 5. Río Carrión.

Esta sección se encuentra al sobrepasar 1,5 km en la misma dirección que la carretera PP-9642 el núcleo urbano de Villanueva del Río por un camino agrícola.

Se llega a un tramo del río Carrión en su parte media-alta. Sus coordenadas para localizar el tramo son 366.318,08 para la coordenada X y 4.682.786,89 para la coordenada Y (Figura 38).



Figura 38. Fotografía de los procesos de medición en el tramo 5.

La elección de este lugar se relaciona con la velocidad de sus aguas en al ser un tramo en el que se incrementa la pendiente del cauce.

El río se encuentra en un régimen lento aguas arriba, hasta que en este punto hay un tramo de unos 200 metros en el que la pendiente del terreno es mayor y alcanza algo más de velocidad las aguas del río Carrión.

El lecho es de cantos rodados de medio tamaño con presencia excepcional de vegetación en el fondo.

Es una zona en la que ya tiene un caudal considerable y un impacto en el paisaje importante. Alrededor de este río, se mantienen varias explotaciones de cultivo intensivo de chopos para pasta de papel o desenrollo de chapa principalmente.

Debido a la excepcional sequía, el caudal se ha retirado hacia las zonas del cauce donde su cota es menor, observando una gran anchura de cantos rodados depositados en la margen izquierda del cauce.

En un año de condiciones hidrológicas normales, se sabe que la anchura mojada es mayor, formando estos cantos parte del lecho del río a su paso por esta sección.

La anchura que se ha medido en esta ocasión es de 14,00 metros, la profundidad media de la sección es de 33 cm y la velocidad media de 0,73 m/s en los puntos medidos del tramo.

Como se muestra en la Figura 39, se aprecia una relación directa entre la velocidad y la profundidad.

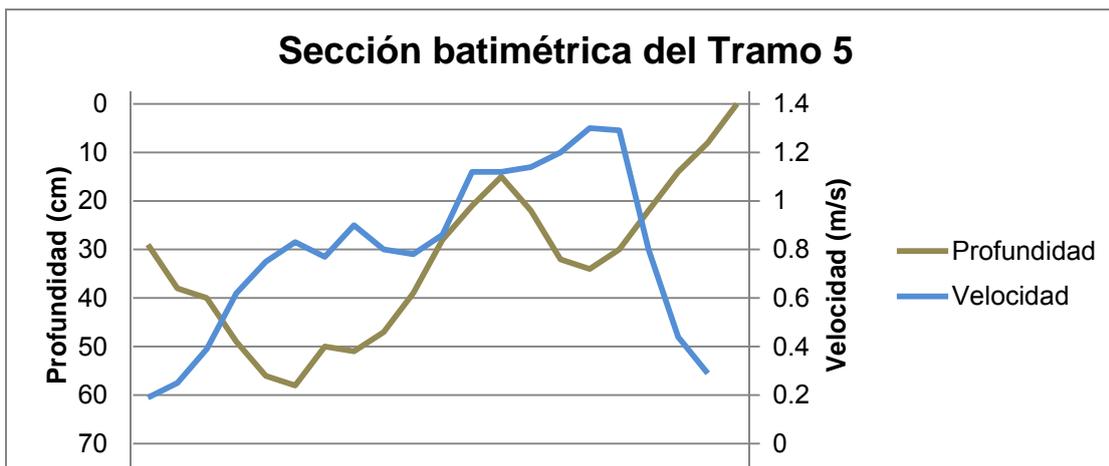


Figura 39. Sección batimétrica del tramo 5.

En ambas orillas de esta sección se aprecia un aumento de la velocidad a medida que aumenta la profundidad de la sección, hasta llegar a una zona máxima en donde comienza a reducirse el calado del río y disminuye su velocidad.

Esto sucede de manera casi simétrica en ambos lados, teniendo en la región central de la sección una zona de menor calado y de velocidad reducida, donde interseccionan ambas líneas. Esta situación hidráulica ha sido bien registrada por el instrumental.

7.5.1 Tramo 6. Río Arlanzón

Este tramo de estudio se encuentra a escasos 500 metros aguas abajo del puente de la carretera P-131 que comunica el núcleo urbano de Palenzuela con la autovía A-62. Las coordenadas geográficas atienden a los puntos 404.775,80 para X y 4.662.824,20 para Y (Figura 40).



Figura 40. Fotografía de los procesos de medición en el tramo 6.

Esta sección cuenta con una profundidad media de 0,34 m y una velocidad media del flujo de agua de 0,47. Como se puede observar en la Figura 41, en el centro de este tramo, es donde se registra la mayor velocidad del flujo del río. Debido a la ausencia de viento, se concluye que el origen más probable de estas perturbaciones sea la velocidad en esos puntos de la sección.

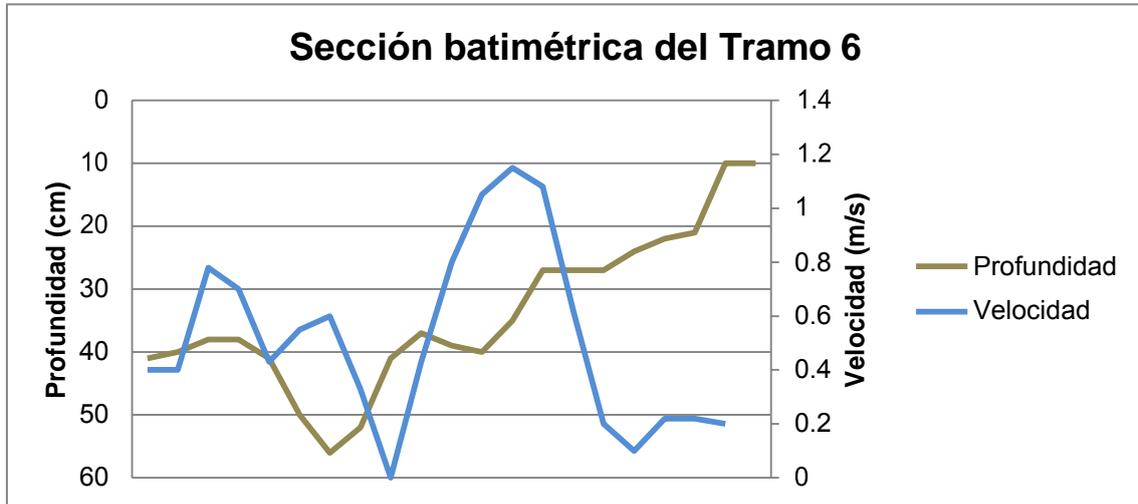


Figura 41. Sección batimétrica del tramo 6.

Esta aceleración, puede deberse también en parte a la existencia de acumulaciones de piedras y rocas de mediano tamaño que ralentizan la circulación del flujo. Esto además produce ondulaciones en la superficie que afectan a la medición en ambas metodologías.

Se puede observar en la gráfica de la sección que justo antes de obtener el máximo de velocidad, se registra un valor casi nulo y también en la zona central de la sección La existencia de rocas en el cauce frente a la sección es una causa más que probable en estos puntos, creando fenómenos de remanso y turbulencias en el cauce.

La profundidad evoluciona de manera progresiva desde una profundidad que ronda los 40 cm hasta ir reduciéndose el calado a medida que nos acercamos a la orilla opuesta en la medida de la sección. Puntualmente se encuentra una zona en la que la profundidad aumenta hasta rozar los 60 cm.

MEMORIA

Anejo 7.2.: Etapas para la consecución del prototipo

El prototipo de perfilador acústico con el que se ha llevado a cabo parte de las tareas de medición en el presente estudio, ha sido diseñado, construido y calibrado por el alumno firmante del presente estudio.

Para ello se ha realizado una inversión de horas en las diferentes fases que se van a enunciar a continuación en la Tabla 9.

Es una estimación temporal, aproximada y no detallada de las principales etapas que se han desarrollado hasta llegar a tener el prototipo operativo.

No es factible una representación aproximada de la distribución de estas horas mediante un cronograma, pues muchos de los procesos son cíclicos y en constante estado de modificación y revisión.

Tabla 9. Relación de horas invertidas en las diferentes fases del desarrollo del prototipo del perfilador acústico.

CONCEPTO	HORAS
Recabar información y antecedentes de instrumentación y metodologías previas existentes.	40
Sopesar el realizar batimetrías por metodología superficial sobre la lámina de agua o sobre soportes de transporte aéreo (drones).	12
Diseño del Sistema de flotación y bastidor para tener la máxima maniobrabilidad en el agua y el mínimo impacto en el ecosistema y el proceso de medición.	2
Diseño del Sistema de propulsión, dirección y elementos innovadores.	2
Estimación de los parámetros a monitorizar (rangos, volumen de datos, etc).	8
Búsqueda de elementos e instrumental necesario al mejor precio para su adquisición.	50
Programación de los procesadores.	180
Planteamientos erróneos que no se han podido materializar: - Utilizar la tecnología Doppler para medir la velocidad. - Incorporar un sensor de turbidez. - Rango de frecuencias operativas. - Maniobrabilidad dentro del cauce. - Etc.	200
Construir el bastidor y la estructura del perfilador acústico.	60
Conectar e instalar el instrumental de medición en el perfilador.	24
Calibrar el instrumental y ajustar los sensores al medio acuático.	130

El total de horas estimadas es de 708 horas, distribuidas a lo largo del año académico 2016 – 2017.

Por la experiencia previa que se ha adquirido, se estima que la reproducción de este sistema de medición, contando con la totalidad de los materiales de los que se compone, se puede construir y calibrar en un periodo de tiempo entorno a los 15 días laborables.

Este prototipo se encuentra en constante modificación, pues se van incorporando mejoras y correcciones a medida que se dispone de tiempo y recursos económicos. Actualmente se están incorporando varias líneas de mejora aún abiertas y en fase de experimentación.