

Desarrollo de la tecnología hidrométrica: instrumentos nuevos y emergentes para trazar los mapas de las condiciones hidrodinámicas de los ríos

por Marian Muste¹, Won Kim² y Janice M. Fulford³

Introducción

Las nuevas demandas de recursos hídricos de la superficie terrestre como consecuencia de una población mundial y de unos niveles de vida en constante aumento, exigen que los gestores hídricos cuenten, cada vez en mayor medida, con unas mejores mediciones de los caudales fluviales. Los gestores necesitan instrumentación sobre el caudal capaz de medir estos recursos de una manera más precisa, detallada y con un coste inferior. Afortunadamente, los recientes progresos alcanzados en este tipo de instrumentación están aumentando de manera considerable nuestras posibilidades de medir los caudales de las aguas de la superficie y la dinámica de las corrientes fluviales.

Hasta hace pocas fechas, la forma en la que los instrumentos medían el caudal y la dinámica de la corriente había permanecido invariable. Las medidas del caudal se basaban en medidores mecánicos de velocidad, que empleaban la fuerza del agua para hacer girar una hélice, método que se había empleado desde principios del siglo pasado. Durante los últimos 20 años, la posibilidad de disponer de sistemas informáticos, electrónicos y con mejores baterías a precios reducidos ha conducido al desarrollo de instrumentos electrónicos para medir la velocidad, contribuyendo así al trazado de

mapas de las condiciones hidrodinámicas de los ríos, algo que, anteriormente, hubiera sido imposible.

Hoy en día, los medidores electrónicos de velocidad que utilizan técnicas acústicas, de radar o por imágenes están revolucionando la medida de caudales del agua de la superficie y la dinámica de corrientes. En la mayor parte de emplazamientos de medida, estos sistemas están reemplazando a los instrumentos mecánicos, convirtiéndose así en los instrumentos predilectos para medir la velocidad. Estos instrumentos ofrecen unas prestaciones superiores en términos de eficacia, rendimiento y seguridad. Además, los instrumentos electrónicos pueden medir velocidades más rápido en áreas más extensas, con una mayor resolución espacial y a un coste más razonable que los instrumentos mecánicos previos.

La nueva y emergente instrumentación es capaz de medir características cinemáticas distribuidas espacialmente en dos y tres dimensiones y que pueden estar relacionadas con importantes aspectos morfológicos e hidrodinámicos de los cursos fluviales naturales. En algunos casos, como ocurre con los nuevos instrumentos basados en tecnologías de radar y de imágenes, el instrumento en sí no entra en contacto con el agua durante el proceso de medición. Por desgracia, ninguna de las guías de la OMM existentes, que son muy anteriores a las nuevas tecnologías

que se están utilizando, hace referencia a la instrumentación más reciente. Sin embargo, muchos grupos, entre los que se incluyen los autores de este artículo, están pendientes del rendimiento y de la capacidad del nuevo instrumental.

Dos instrumentos electrónicos de velocidad, como son los perfiladores de corriente de efecto Doppler acústicos (ADCP) y los velocímetros gráficos de partículas a gran escala (LSPIV), constituyen ejemplos de instrumentos nuevos y emergentes de medida de la velocidad que están cambiando el modo de medir los recursos hídricos de la superficie. Estos instrumentos pueden medir de forma eficaz las velocidades de los ríos que sean necesarias para comprender mejor los complejos procesos geomórficos, hidrológicos y ecológicos que afectan a los cauces fluviales, así como su interacción en condiciones normales y extremas. En este artículo se presentan algunos estudios recientes de comparación con los métodos e instrumentos más antiguos, que ponen de relieve la utilidad de los ADCP y el potencial de los dispositivos LSPIV en la medida de caudales.

Perfiladores de corriente de efecto Doppler: funcionamiento

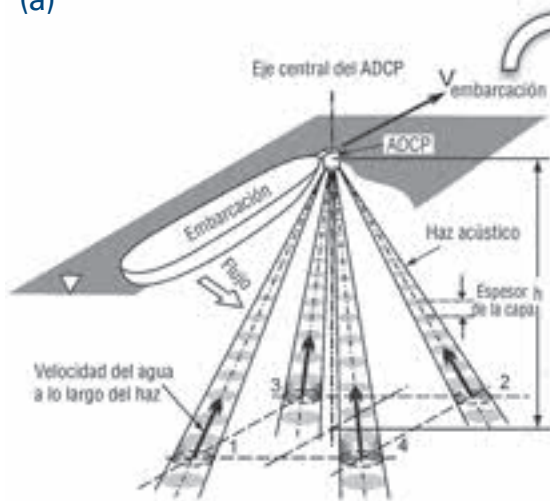
El ADCP es un nuevo instrumento que suele instalarse sobre embarcaciones (mirando hacia abajo), aunque también puede fijarse en el fondo (mirando hacia arriba) o en la orilla (mirando hacia un lado). Los ADCP necesitan que el sensor esté en contacto con el agua, para así poder transmitir y medir los pul-

1 Instituto de Investigaciones Hidráulicas-Hidrociencias e Ingeniería de Iowa, Universidad de Iowa, Iowa City (EEUU)

2 Instituto Coreano de Tecnología de la Construcción, Seúl (República de Corea)

3 Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), Centro Espacial Stennis, Mississippi 39529 (EEUU)

(a)



(b)



Figura 1 – Principio operativo de un perfilador de corriente de efecto Doppler (configuración Teledyne RDI ADCP): (a) disposición del haz; (b) resultado de la medición

Los sonoros (pings) dirigidos a través de la columna de agua. Los reflejos de estos pulsos sonoros, o bien el eco procedente de partículas o burbujas pequeñas y suspendidas que se mueven en los haces acústicos (Figura 1), producen un desplazamiento en el sonido transmitido, a partir del cual se determina la velocidad. Este fenómeno, el desplazamiento Doppler, es el mismo que el cambio en el tono percibido por una persona cuando un tren que está accionando un silbato pasa junto a ella. Los pulsos enviados en diferentes direcciones o haces (normalmente, 3 ó 4) desde el ADCP detectan diferentes componentes de la velocidad, de forma paralela a cada uno de los haces. Suponiendo que las corrientes sean uniformes (homogéneas) dentro de las capas de espesor constante, se emplea una transformación trigonométrica para convertir la velocidad registrada a lo largo de los haces en tres componentes de velocidad asociadas a un sistema de coordenadas cartesianas orientado hacia el instrumento. Cada pulso acústico procedente de un ADCP instalado sobre una embarcación origina mediciones de la velocidad a lo largo de la profundidad del caudal (Figura 1).

Los dispositivos ADCP instalados sobre una embarcación en movimiento pueden medir con relativa facilidad el perfil multicomponente de la velocidad por debajo de aquella, proporcionando de forma automática información sobre la velocidad, profundidad y localización allá por donde se desplace la embarcación. Los fabricantes de instrumentos (por ejemplo, RDI, 1996) establecen un 0,25 por ciento de margen de error en la precisión de las mediciones de velocidad efectuadas en condiciones ideales de velocidades horizontales uni-

formes, que no son habituales, si es que alguna vez se producen. Unas malas condiciones de medida, en las que el agua cuenta con pocas o inexistentes pequeñas partículas suspendidas para reflejar los pulsos sonoros o con excesivas concentraciones de sedimentos que absorben los pulsos sonoros, puede impedir la utilización de los dispositivos ADCP. Asimismo, en algunas condiciones de medición, como en las existentes junto a una pared vertical, la hipótesis de velocidades horizontales uniformes no es válida y pueden producirse errores de medición. Los errores de velocidad también pueden surgir cuando no se utiliza el GPS y hay sedimentos que se desplazan a través del fondo del cauce. Existe una amplia bibliografía de referencia en la que se describen los principios, configuración y aspectos operativos básicos de los ADCP (por ejemplo, RDI, 1996; SonTek, 2000).

Perfiladores de corriente de efecto Doppler: capacidad de medida

Aunque los medidores acústicos de velocidad se emplearon en primera instancia para medir la velocidad en entornos oceanográficos, el desarrollo de los ADCP para condiciones de aguas más someras derivó en su aplicación a los caudales fluviales. El *United States Geological Survey* (Servicio Geológico de los Estados Unidos, USGS) utilizó por primera vez los ADCP en 1985, y publicó la descripción de un sistema para medir el caudal en tiempo real mediante un ADCP en 1993 (Simpson y Oltmann, 1993).

Las comparaciones de las medidas de caudal con medidores mecánicos contrastados han respaldado el uso de los ADCP para medir el caudal (Mueller, 2003).

Los ADCP constituyen una herramienta establecida para las medidas fluviales y son varias las empresas que los fabrican (RDI, 1996; SonTek, 2000). Actualmente, tanto los medidores acústicos de velocidad en un punto como los ADCP se emplean en aproximadamente el 30 por ciento de las mediciones de caudal que lleva a cabo el USGS (Oberg y otros, 2005). Los ADCP han sustituido en gran medida el uso de los medidores mecánicos en embarcaciones del USGS. Además, los ADCP pueden medir de forma precisa el caudal en ríos que tengan corrientes bidireccionales en la columna de agua sin necesidad de emplear técnicas especiales, puesto que los instrumentos miden la velocidad y dirección de la corriente. Los instrumentos mecánicos de velocidad suelen medir simplemente la velocidad de la corriente, a menos que se utilice alguna técnica especial.

La mayor parte de las mediciones ADCP en ríos han sido llevadas a cabo desde embarcaciones en movimiento para obtener datos sobre los caudales, y así sigue sucediendo. Las embarcaciones (tripuladas o amarradas) con dispositivos ADCP navegan por el río entre puntos opuestos de sus orillas (un transecto) para llevar a cabo medidas de la corriente. Pueden obtenerse datos sobre el caudal a través de la utilización de algoritmos personalizados desarrollados para las mediciones ADCP llevadas a cabo desde embarcaciones en movimiento (RDI, 1996) o a partir de algoritmos convencionales que emplean el posicionamiento de una embarcación fija con el método de área-velocidad. En consecuencia, el software instrumental se diseña de forma personalizada para llevar a cabo mediciones de caudal, sin prestar demasiada atención a la información adicional que pueda extraerse a partir de las velocidades brutas del dispositivo ADCP. En comparación con los tradicionales instrumentos mecánicos de velocidad, un ADCP es capaz de generar, de forma rápida y eficaz, el gran volumen de datos que se produce durante una medición de caudal. Por ejemplo, en las configuraciones operativas de la medición del caudal llevadas a cabo en el caso del río Kissimmee (Florida) (Merwade y otros, 2008) se usaron unos 800 pulsos acústicos (pings) individuales para generar mediciones en 8 000 localizaciones (o "bins" acústicos) a lo largo del transecto de medida.

Debido al creciente interés por la calidad de las corrientes de agua y por los hábitats acuáticos de la superficie, se necesita información adicional para realizar actividades de control, elaboración de modelos e investigación en materia de transporte de sedimentos, socavación, estructuras hidráulicas y restauración de hábitats. En realidad, buena parte de la información necesaria, como por ejemplo el cálculo de las fuerzas ejercidas por el agua y la posible medición de las concentraciones de sedimentos, está disponible en los archivos ADCP sin procesar, aunque los fabricantes de la instrumentación no suministran las herramientas adecuadas de proceso y extracción. De cara a este propósito, diversos grupos de usuarios han desarrollado algoritmos personalizados.

Las mediciones llevadas a cabo por Merwade y otros [ibid.] en el río Kissimmee ponen de manifiesto la capacidad de los dispositivos ADCP para suministrar otros datos además de los relativos al caudal mediante la utilización de programas informáticos personalizados como, por ejemplo, el AdcpXP, desarrollado por el Instituto de Investigaciones Hidráulicas de Iowa (Kim y otros, 2005). Los archivos sin analizar pueden procesarse de forma que describan información sobre la velocidad del río o sobre la derivada de la velocidad, ya sea en forma de valores generales o medios para una sección transversal (una dimensión) o como valores locales en puntos específicos de la corriente (como en dos y tres dimen-

siones). Algunos ejemplos de información unidimensional que puede determinarse a partir de los archivos ADCP sin procesar son los siguientes: la profundidad transversal media, la velocidad transversal media y el número de Froude.

El software de presentación puede utilizarse con datos ADCP con el fin de mostrar cómo varía la velocidad local dentro de una sección transversal de un río (véase la Figura 2). Es posible determinar las características medias y de turbulencia en la sección transversal de un río, a partir de las velocidades recopiladas en un cierto tiempo, mediante el amarre o anclaje de la embarcación provista del dispositivo ADCP en una localización fija (Szupiany y otros, 2007). Algunos ejemplos de información en dos y tres dimensiones que puede determinarse a partir de los archivos ADCP sin procesar son los siguientes: representaciones gráficas de vectores de velocidad, representaciones gráficas de líneas de contorno de magnitudes de velocidad, remolinos, surgencia, y velocidades medias y turbulencia en puntos fijos de la corriente.

Velocímetros gráficos de partículas a gran escala: funcionamiento

Los dispositivos LSPIV son instrumentos emergentes que se basan en una tecnolo-

gía de imágenes denominada velocimetría gráfica de partículas (PIV), que se utiliza en laboratorios de fluidos.

Durante los últimos 30 años, los rápidos progresos experimentados en los campos de la óptica, el láser, la electrónica y la programación y arquitectura informáticas han originado un aumento sustancial en la utilización de técnicas gráficas de visualización de corrientes y en la realización de mediciones cuantitativas en los laboratorios. Sin embargo, el LSPIV aún tiene que validarse sobre el terreno para la misma gama de condiciones de medida de caudales que los ADCP.

Los velocímetros gráficos de partículas han mejorado sobremanera nuestra capacidad de medir los vectores instantáneos de velocidad en numerosos caudales generados en el entorno controlado de un laboratorio (por ejemplo, Adrian, 1991). Un aspecto atrayente de los velocímetros gráficos es su inherente simplicidad, es decir, la utilización de imágenes en vez de los datos de salida de un transductor, como por ejemplo señales, lo que hace que esta técnica sea más sencilla que sus antecesoras. 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, a fin de obtener detalles del caudal. Estas ventajas han supuesto que los velocímetros gráficos se hayan convertido rápidamente en el método predilecto para obtener medidas detalladas de la turbulencia en los flujos de laboratorio de dos y tres dimensiones. A pesar de su popularidad, las técnicas de la velocimetría gráfica no han gozado de una aplicación a gran escala fuera de los laboratorios de fluidos.

Las primeras mediciones de velocimetría gráfica en entornos fluviales fueron realizadas en Japón por Fujita y Komura (1994) y requerían la formación de imágenes 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 convencionales, a saber: iluminación (por medio del Sol), marcado del caudal, registro de imágenes y proceso de las mismas. Puesto que las imágenes de la técnica LSPIV suelen registrarse desde un ángulo oblicuo, es preciso aplicar una corrección adicional sobre ellas.

El proceso de medición se inicia con la toma de imágenes de la superficie del agua desde

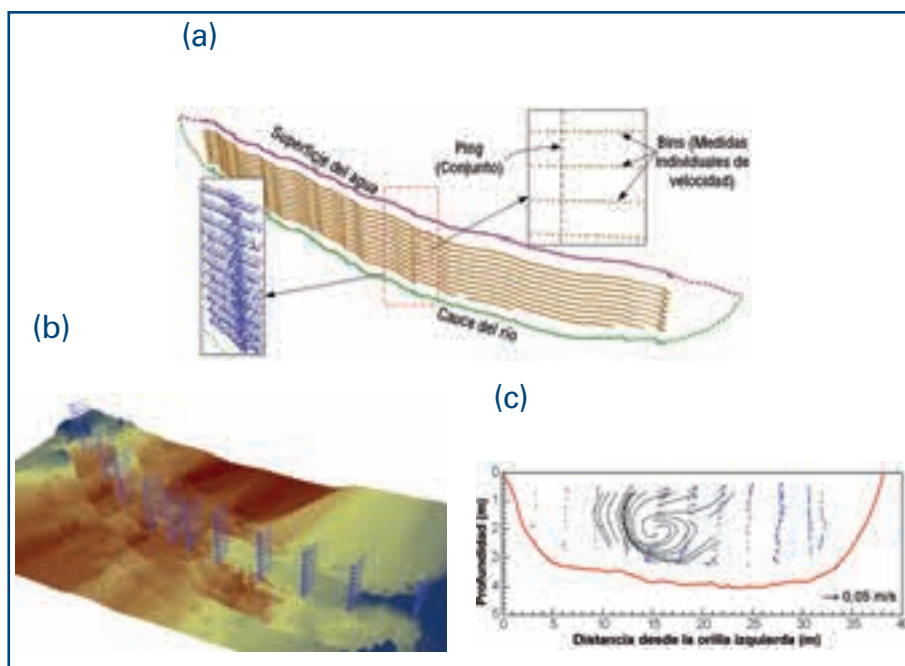


Figura 2 – Ilustración de las posibilidades del sistema ADCP para ofrecer información fluvial multidimensional: (a) campo vectorial instantáneo de velocidades obtenido por un ADCP controlado desde embarcaciones móviles; (b) distribución de la velocidad media en las verticales seleccionadas; (c) representación de la circulación transversal

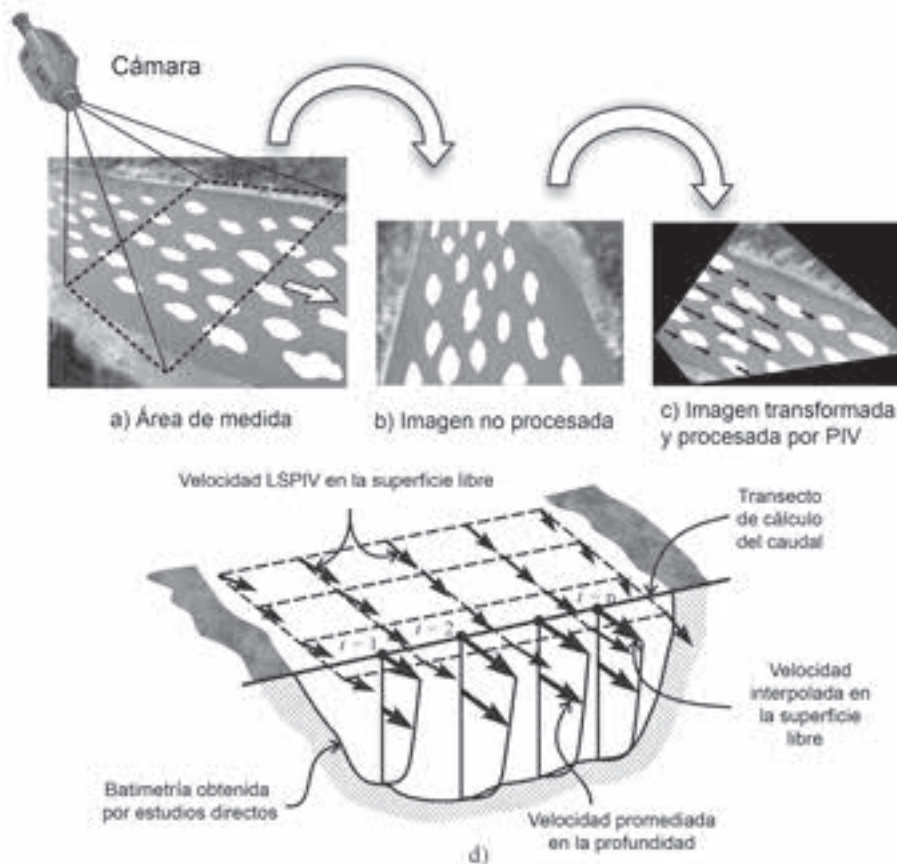


Figura 3 – Fundamento y componentes operativos de los velocímetros gráficos de partículas a gran escala (LSPIV): (a) iluminación y marcado; (b) registro de la imagen; (c) reconstrucción de la imagen para obtener imágenes ortorrectificadas y proceso de las mismas; (d) algoritmo para calcular el caudal fluvial a través de las mediciones LSPIV en la superficie libre

una posición elegida estratégicamente (Figura 3). El movimiento de la superficie del agua sólo es perceptible si contiene elementos visibles que se muevan con la corriente. En muchas situaciones aparecen configuraciones flotantes en el río que se generan de forma natural (como espuma, sifonamientos, pequeños residuos y ondulaciones en la superficie libre) que proporcionan, de forma muy eficaz, elementos visibles que actúan como trazadores del caudal. En caso de que no existan, puede llevarse a cabo un marcado artificial de la zona del caudal que se desea medir.

Tal y como ya se ha comentado, las imágenes registradas se deforman geométricamente debido al efecto de perspectiva introducido en la imagen tomada desde un ángulo oblicuo. Las imágenes fotográficas se transforman hasta adquirir una apariencia no deformada y luego se procesan para obtener las velocidades en la superficie del agua. El movimiento de la corriente se calcula a partir de pares de imágenes consecutivas, a través de inferencias estadísticas llevadas

a cabo sobre las configuraciones de imágenes correspondientes a la flotación sobre la superficie libre. 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 utilizando 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 media en la columna de agua, y se multiplica por la subárea correspondiente a la batimetría de la sección transversal, tal y como se muestra en la Figura 3(d). La batimetría del cauce puede obtenerse a partir de estudios directos realizados con instrumental especializado (por ejemplo, un sónar o un dispositivo ADCP). La batimetría del cauce puede estudiarse en el momento de realizar las mediciones LSPIV o con anterioridad a estas, partiendo de la base de que la batimetría no cambia en el intervalo de tiempo existente entre las mediciones efectuadas en el agua del fondo y de la superficie.

Si las medidas de campo se llevan a cabo con poca iluminación sobre la superficie del agua, con un marcado escaso o con otras condiciones adversas de medición que influyan en la superficie del agua, estas mediciones podrían ver drásticamente reducida su precisión o, incluso, resultar imposibles.

| Configuración | Características fundamentales | |
|--|-------------------------------|--|
| LSPIV en tiempo real (RTLSPIV) Medición gráfica del caudal en tiempo real, sin contacto y en localizaciones fijas de la corriente. | | |
| LSPIV móvil (MLSPIV) Unidad de medición gráfica de la velocidad en la superficie libre, que puede desplegarse rápidamente en emplazamientos fluviales donde se requieren mediciones con una preparación mínima durante episodios de caudales normales y extremos. | | |

Figura 4 – Configuraciones alternativas del sistema LSPIV

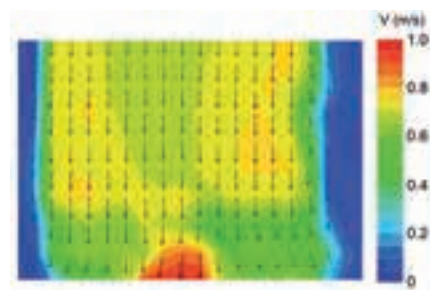
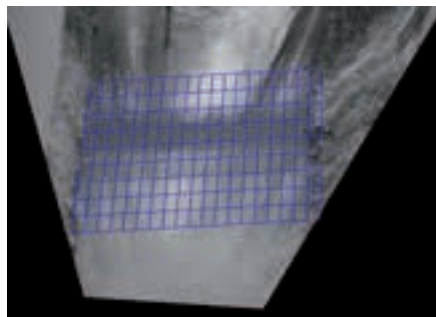


Figura 5 – Mediciones LSPIV en un pequeño riachuelo: (a) imagen sin procesar; (b) imagen transformada, en la que se señala la malla empleada para calcular los vectores de velocidad; (c) campo vectorial medio resultante

Normalmente, se necesita la luz solar para realizar medidas LSPIV, siendo complicada la medición en horario nocturno. En el caso de caudales sin patrón ni trazadores, podrían obtenerse velocidades erróneas y verse reducida la resolución del mapa de velocidad. Un mal ángulo de la cámara con respecto al caudal puede originar, asimismo, una menor resolución. La precisión de la medición del caudal mediante el sistema LSPIV depende de la batimetría empleada, de la hipótesis de variación de la velocidad con la profundidad y de la medición de la elevación del agua durante el proceso de medida. La batimetría registrada previamente podría diferir de la existente durante el proceso de medida, y el ajuste de las velocidades del agua de la superficie a una velocidad media en la columna de agua podría no resultar demasiado preciso. En corrientes con movimiento lento, especialmente en combinación con el viento, las velocidades superficiales medidas por el sistema LSPIV no son fiables de cara a las mediciones del caudal.

Las configuraciones LSPIV han mejorado continuamente e incluyen un sistema fijo LSPIV que mide constantemente y en tiempo real el caudal del río Iowa (Hauet y otros, 2008), así como un sistema móvil situado en una furgoneta y que puede desplegarse cerca de prácticamente cualquier emplazamiento de medición de caudal (Kim, 2008). Las características fundamentales de estas configuraciones se representan en la Figura 4.

Velocímetros gráficos de partículas a gran escala: capacidad de medida

La ventaja fundamental del sistema LSPIV es que, de forma remota y simultánea, puede medir las velocidades del caudal en toda la superficie de la corriente registrada en imágenes y con una mayor resolución que los sistemas de radares de alta frecuencia (HF). La resolución de los sistemas de

radares HF suele estar limitada a 300 m, mientras que los LSPIV pueden tener resoluciones de un metro, o incluso menos. Esta característica es exclusiva de los sistemas LSPIV entre los instrumentos medidores de velocidad. Utilizando los sistemas LSPIV se han representado, de forma no intrusiva, mapas de áreas que van desde los 100 hasta los 5 000 m² con el fin de ofrecer campos vectoriales instantáneos de velocidad, así como para documentar las configuraciones de corriente y medir los caudales fluviales (Muste y otros, 2008). Gracias a la capacidad de los dispositivos LSPIV de medir la velocidad de forma remota, este sistema resulta idóneo en situaciones en las que algunos residuos flotantes pudieran dañar el instrumental situado dentro del agua y poner en riesgo al personal allí desplazado. Este aspecto tiene una importancia vital durante períodos con alto caudal, que pueden ser potencialmente peligrosos para los instrumentos y el personal técnico encargado de llevar a cabo las mediciones.

Se están investigando las técnicas basadas en imágenes, que se emplean para medir caudales de forma no intrusiva (por tele-detección), así como para determinar con exhaustividad la hidrodinámica fluvial en los Estados Unidos y en la República de Corea (Muste y otros, 2008), y en Japón y Francia (Hauet y otros, 2008). Las mediciones LSPIV sin procesar se transforman en campos vectoriales instantáneos de la zona registrada en imágenes, tal y como se muestra en la Figura 5(a). A partir del campo vectorial del LSPIV se pueden determinar ciertas características espaciales y temporales del caudal, como por ejemplo velocidades medias, líneas de corriente y vorticidad, y también otras magnitudes derivadas de la velocidad, como es el caso del caudal. En las situaciones donde se cumplen los requisitos del sistema LSPIV, la técnica puede medir de forma eficaz las velocidades del caudal superficial en numerosas localizaciones, con un esfuerzo mucho menor del que se necesi-

taría con instrumental de perfilado o situado en puntos concretos. En situaciones como las mediciones durante episodios de caudal extremo (crecidas o huracanes) o en casos de un caudal muy lento y de poca profundidad, el sistema LSPIV podría ser la única alternativa de medida válida. Como el LSPIV es un instrumento emergente, los trabajos publicados al respecto son limitados, y cubren tan solo una pequeña muestra de las condiciones fluviales en las que se suelen llevar a cabo las mediciones del caudal.

Comparación de las mediciones

Recientemente se ha llevado a cabo un estudio en el que se comparan las posibilidades de medida del sistema LSPIV con los ADCP, los medidores mecánicos y el método del índice de velocidad para una variedad de caudales. El lugar elegido para el ensayo es un tramo recto de 3,3 kilómetros de longitud sobre un cauce de piedras estable, situado aguas abajo de la central hidroeléctrica de Goesan (Corea). Existe una estación oficial de aforo en el tramo y la presa situada aguas arriba del tramo de pruebas ofrece un amplio abanico de caudales, que varían desde los 6 m³/s hasta los 1 400 m³/s, dependiendo de la estación del año.

Se emplearon dos métodos diferentes de medición con el sistema ADCP: una embarcación en movimiento y una embarcación fija amarrada. En el método de la embarcación en movimiento se utilizó un equipo ADCP Río Grande de 1 200 kHz, instalado sobre una embarcación inflada, y se realizaron, al menos, cuatro transectos en el río. En el caso del método de la embarcación fija amarrada se usó un sistema ADP River Cat situado en 20 ó más emplazamientos a lo largo del transecto de medida con arreglo a la norma ISO 748 (ISO, 2007). En la medición del caudal mediante la técnica LSPIV

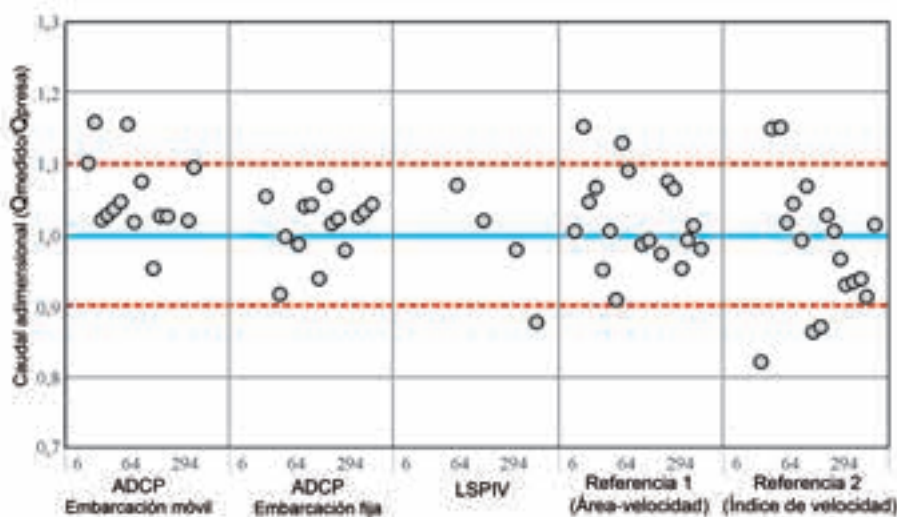


Figura 6 – Intercomparación de los sistemas ADCP, LSPIV y otros métodos

se empleó una cámara digital, aunque se efectuaron menos mediciones que con el sistema ADCP.

Se emplearon dos métodos de forma simultánea para la comparación: una técnica convencional de área-velocidad mediante la utilización de un instrumento mecánico, y un método de índice de velocidad con un instrumento acústico fijo de medición de la velocidad. El instrumento mecánico, un medidor de corriente Price AA estándar, se utilizó por inmersión en aguas poco profundas o empleando un puente-grúa en una corriente más rápida y profunda. En al menos 20 emplazamientos del transecto de medida se realizaron mediciones de área-velocidad con arreglo a la norma ISO 748.

El método del índice de velocidad consiste en la medición continua de la corriente

empleando un medidor de velocidad Doppler acústico con exploración lateral (modelo: Argonaut-SL 1,5 MHz) para medir una velocidad de referencia en la sección de medida. Más adelante, esta velocidad de referencia y el nivel del agua pueden utilizarse para calcular el caudal a través de una relación entre el caudal, la velocidad de referencia y el nivel del agua en la zona de medida o en sus proximidades. La relación se obtiene a partir de muchas mediciones efectuadas mediante la utilización de la técnica convencional de área-velocidad con un medidor de corriente Price AA.

Durante el período comprendido entre 2005 y 2007 se llevaron a cabo medidas simultáneas del caudal utilizando los métodos ADCP, LSPIV y los métodos de comparación. El caudal registrado por los sistemas ADCP, LSPIV y los métodos de comparación fue sometido

a un proceso de contraste con respecto al caudal de la presa, es decir, el determinado a partir de la configuración de la compuerta. Previamente se halló la relación entre la configuración de la compuerta y el caudal por medio de un proceso de simulación en laboratorio. La Figura 6 muestra el caudal adimensional medido a través de los sistemas ADCP, LSPIV y los métodos de comparación. El caudal adimensional es el cociente de dividir el caudal medido con un instrumento o un método por el caudal de la presa. El caudal medido con el método de la embarcación fija con sistema ADCP se encuentra dentro del +/- 10 por ciento del caudal de la presa, mientras que la medición del caudal por el método de la embarcación en movimiento con sistema ADCP también cuenta con una buena sintonía con respecto al caudal de la presa, aunque con una desviación ligeramente positiva. Aunque no hay muchos casos en los que se emplee el método LSPIV de medición, el caudal resultante también es bastante similar al de la presa.

La tabla adjunta resume los datos estadísticos de los caudales adimensionales en función del tipo de método de medida. Los caudales medios adimensionales que sean mayores o menores que la unidad indican una desviación positiva o negativa con respecto al caudal de la presa. Los valores más reducidos de la desviación típica y del error cuadrático medio también son indicadores de una sintonía más estrecha con respecto al caudal de la presa. Un intervalo de confianza más reducido según la distribución t (t de Student para un intervalo de confianza del 95 por ciento) señala la importancia del caudal medio adimensional (y de la desviación asociada).

Resumen estadístico de las técnicas de medida del caudal

| Índice estadístico | Técnicas de medida del caudal | | | | |
|---|------------------------------------|-----------------------------------|--------|----------------|---------------------|
| | Embarcación móvil con sistema ADCP | Embarcación fija con sistema ADCP | LSPIV | Área-velocidad | Índice de velocidad |
| Caudal medio adimensional | 1,055 | 1,013 | 0,987 | 1,022 | 0,983 |
| Desviación típica de las diferencias relativas | 5,7 | 4,4 | 8,1 | 6,5 | 9,3 |
| Error cuadrático medio de las diferencias relativas | 2,2 | 1,3 | 4,8 | 1,7 | 2,2 |
| Intervalo de confianza según la distribución t | ±3,29 | ±2,54 | ±12,89 | ±3,23 | ±4,78 |

Debido al reducido número de medidas realizadas, ninguna de las desviaciones señaladas por cualquiera de los caudales medios adimensionales es estadísticamente significativa. Los métodos de área-velocidad y de la embarcación fija con ADCP cuentan con valores estadísticos similares y esas mediciones son muy parecidas a las del caudal de la presa. Las mediciones efectuadas con arreglo a la técnica de la embarcación en movimiento con ADCP se asemejan más al caudal de la presa que las técnicas LSPIV o la del índice de velocidad. Las mediciones LSPIV son las que tienen la mayor variabilidad (grandes valores de desviación típica y de error cuadrático medio) de todas las técnicas. Sin embargo, el pequeño número de mediciones LSPIV limita la importancia de sus estadísticas.

Perspectiva general

Para aplicar de forma correcta cualquier instrumento en un proceso de medida es preciso comprender sus principios básicos de funcionamiento. Además, en el caso de los instrumentos nuevos y emergentes, antes de que pasen a utilizarse de forma habitual deberían llevarse a cabo procesos cuidadosos de evaluación de las posibilidades de medida de tales instrumentos. Los sistemas ADCP se han convertido en herramientas ya maduras para la realización de tareas de medición en entornos fluviales, con una capacidad bien documentada, mientras que la técnica LSPIV aún está en proceso de análisis, y se están haciendo importantes esfuerzos para desarrollarla y conseguir que sea sólida ante diversas condiciones de medición. En general, la técnica LSPIV no puede ser considerada como un instrumento "todo en uno", sino como un elemento que complementa de forma eficaz otros instrumentos y que presta un apoyo eficaz a varios propósitos de medición.

La movilidad, autonomía y velocidad de la medición son aspectos que podrían hacer que los sistemas ADCP y LSPIV resulten adecuados para realizar mediciones intensivas durante el desarrollo de episodios hidrológicos normales y extremos. Estas nuevas tecnologías han iniciado una nueva era en la medición fluvial, al reducir costes y esfuerzos aumentando el número de medidas y permitiendo que estas puedan efectuarse en situaciones de riesgo. El uso

de la nueva generación de instrumentos podría arrojar luz sobre procesos de vital importancia, como por ejemplo la interacción de las corrientes del cauce principal y de las aguas de desbordamiento (plana de inundación) durante las crecidas, el impacto de las corrientes de las planas de inundación sobre la vegetación y el hábitat ribereño, la evolución de las corrientes con meandros y el efecto de las estructuras fluviales sobre el ecosistema del río. Las estimaciones de las componentes del caudal altamente dimensionales que han ofrecido los nuevos instrumentos pueden llevar a obtener avances en materia de control fluvial de la estabilización de caudales, cambio en la batimetría por la eliminación de presas, erosión en los márgenes, ecología de corrientes de agua y humedales, recuperación de corredores fluviales e impacto medioambiental. Actualmente, el proyecto de "Evaluación del funcionamiento de los instrumentos y técnicas de medida del caudal" (Fulford y otros, 2007), de la Comisión de Hidrología de la OMM, está llevando a cabo una evaluación general de los sistemas ADCP y LSPIV, y de muchos de los nuevos instrumentos de la categoría considerada como no intrusiva.

Referencias

ADRIAN, R.J., 1991: Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics, *Ann. Rev. Fluid. Mech.*, (23), 261-304.

FUJITA, I. and S. KOMURA, 1994: On the accuracy of the correlation method, *Proceedings of the 6th International Symposium on Flow Visualization*, 858-862.

FULFORD, J., P. PILON, Z. KOPALIANI, P. MCCURRY and C. CAPONI, 2007: Call for collaboration in WMO project for the Assessment of the Performance of Flow Measurement Instruments and Techniques, *J. Hydr. Engrg.*, 133 (12), 1439-1440.

HAUET, A., A. KRUGER, W. KRAJEWSKI, A. BRADLEY, M. MUSTE, J.-D. CREUTIN and M. WILSON, 2008: Experimental system for real-time discharge estimation using an image-based method, *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(2), 105-110.

ISO, 2007: Hydrometry—Measurement of Liquid Flow in Open Channels Using Current-Meters or Floats; ISO 748, 46 pp.

KIM, D., M. MUSTE and L. WEBER, 2005: Development of new ADCP post-processing and visualization capabilities, *Proceedings, XXXI IAHR Congress*, Seoul, Republic of Korea.

KIM, W., 2008: Intercomparison of new hydrometric techniques in an experimental river reach, *Proceedings, Experiences and Advancements in Hydrometry*, Korea Institute of Construction Technology, Seoul, Republic of Korea.

MERWADE, V., D. KIM and M. MUSTE, 2008: Characterization of river morphology and hydrodynamics with acoustic methods, *Water Resources Research* (en revisión).

MUSTE, M., I. FUJITA and A. HAUET, 2008: Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments, special issue on hydrologic measurements, *Water Resources Research*, (enviado).

MUELLER, D.S., 2003: Field evaluation of boat-mounted acoustic Doppler instruments used to measure streamflow, *Proceedings IEEE/OES Seventh Working Conference on Current Measurement Technology*, 30-34.

OBBERG, K.A., S.E. MORLOCK and W.S. CALDWELL, 2005: *Quality-Assurance Plan for Discharge Measurements Using Acoustic Doppler Current Profilers*, US Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5183.

RD Instruments, 1996: *Acoustic Doppler Current Profilers—Principle of Operation, A Practical Primer*, San Diego, CA, USA.

SIMPSON, M.R. and R.N. OLTSMANN, 1993: *Discharge-Measurement Systems Using an Acoustic Doppler Current Profile with Applications to Large Rivers and Estuaries*, US Geological Survey Water-Supply Paper 2395.

SONTEK, 2000: Doppler velocity log for ROV/AUV applications, *SonTek Newsletter*, 6 (1), SonTek, San Diego, CA, USA.

SZUPIANY, R.N., M.L. AMSLER, J.L. BEST and D.R. PARSON, 2007: A comparison of fixed- and moving-vessel flow measurements with an ADCP in a large river, *J. Hydr. Engrg.*, 133 (12), 1299-1309.