

MONITORIZACIÓN DE DOS CUENCAS HIDROLÓGICAS EN LA COMUNIDAD DE MADRID MEDIANTE EL EMPLEO DE SENSORES DOPPLER PARA EL AFORO DE CORRIENTES

Victoriano Martínez Álvarez¹, Ana Isabel García García² y Francisco Ayuga Téllez³

Resumen:

La obtención de datos foronómicos de calidad es fundamental para la evaluación de modelos hidrológicos. Con el fin de evaluar distintos modelos distribuidos, propuestos para la predicción de avenidas de diseño en pequeñas cuencas rurales no aforadas, se instalaron a principios de 1998 dos estaciones de aforo en sendos cauces naturales de la Comunidad de Madrid. Éstas están equipadas con una membrana de presión, que mide la altura de la lámina de agua en el canal, y un emisor-receptor de ondas de alta frecuencia, que relaciona el efecto Doppler producido por las partículas arrastradas en la corriente con la velocidad media del flujo. La información registrada nos permite conocer el caudal circulante en cada instante por el punto de aforo mediante la aplicación del método área-velocidad. La aplicación de esta tecnología al aforo de corrientes naturales es innovadora en nuestro país, por lo que las ventajas, inconvenientes y limitaciones encontradas, tras cuatro años de experiencia en las cuencas monitorizadas, son de inmediata aplicación para otros investigadores y Administraciones interesados en esta tecnología. Finalmente, se estudian las posibilidades de aplicación de esta técnica en cauces mayores.

Palabras clave: Hidrología, aforo, cauces naturales, doppler, área-velocidad.

INTRODUCCIÓN

El estudio hidrológico de pequeñas cuencas rurales, caracterizadas por la total ausencia de datos foronómicos, se viene realizando mediante el empleo de modelos hidrometeorológicos. Estos modelos, partiendo de la información climatológica y de las propiedades físicas y geomorfológicas de cada cuenca, estiman los recursos hídricos superficiales y la magnitud de sus avenidas, con el fin de diseñar adecuadamente todo tipo de infraestructuras que interactúen con el sistema hidrológico.

Con el fin de contrastar las ventajas teóricas de la modelación distribuida en el estudio hidrológico de pequeñas cuencas no aforadas, se inició un proyecto de investigación en el año 1996 financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (proyecto HID96-1291) que ha dado lugar al desarrollo de varios modelos hidrológicos distribuidos para el estudio de eventos en este tipo de cuencas (Martínez, 1999; Martínez et al., 1999).

Estos modelos, completamente integrados en el sistema de información geográfica *ArcInfo*, ofrecen varias posibilidades tanto para el tratamiento de la precipitación como para la génesis de la escurrimiento y la traslación de la misma sobre la cuenca, con el fin de sintetizar el hidrograma del evento.

La evaluación experimental de los modelos propuestos requiere la disponibilidad de información meteorológica y foronómica de calidad en pequeñas cuencas con régimen hidrológico natural. Tras un periodo de consultas a las Instituciones nacionales implicadas en la gestión de esta información, nos encontramos ante la total ausencia de datos útiles para nuestros propósitos, sobre todo en lo que se refiere al aforo de caudales, por lo que se planteó la necesidad de establecer nuestras propias cuencas experimentales. Para realizar esta tarea se revisaron las distintas metodologías existentes para el aforo de corrientes libres (Domínguez et al., 1984; Bos et al., 1984; Miller, 1996; Hardy et al., 1998), así como las tecnologías aplicadas por las empresas suministradoras de este tipo de equipamiento para la aplicación de cada una de ellas (Grant y Dawson, 1996).

¹ Departamento de Ingeniería de Alimentos y del Equipamiento Agrícola de la Universidad Politécnica de Cartagena. Paseo Alfonso XIII, 48. 30203 Cartagena (Murcia). victoriano.martinez@upct.es.

² Departamento de Proyectos y Planificación Rural de la Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S. I. agarcia@ppr.etsia.upm.es.

³ Departamento de Construcción y Vías Rurales de la Universidad Politécnica de Madrid. ayuga@cvr.etsia.upm.es. E.T.S. I. Agrónomos. Avd. Complutense, s/n. Ciudad Universitaria. 28040 Madrid.

Artículo recibido el 6 de marzo de 2000, recibido en forma revisada el 4 de octubre de 2001 y el 10 de abril de 2002 y aceptado para su publicación como *nota técnica* el 26 de marzo de 2004.

Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

Como resultado se han establecido dos cuencas experimentales en la Comunidad de Madrid, que han sido instrumentalizadas con los equipos necesarios para el registro de las variables hidrológicas implicadas en la evaluación de los modelos distribuidos propuestos. Los datos fundamentales a registrar en las cuencas seleccionadas son la precipitación y el hidrograma de escorrentía a intervalos de tiempo pequeños (5-15 minutos). Simultáneamente se realizó un estudio sobre las características de los suelos y la cobertura vegetal en cada una de las cuencas, con el fin de obtener la información necesaria para estimar la transferencia de lluvias a escorrentías mediante el método del número de curva (USDA SCS, 1985).

El presente artículo describe las obras e instalaciones realizadas para la monitorización de las dos pequeñas cuencas hidrológicas. La tecnología de aforo empleada en los cauces naturales seleccionados consiste en el uso conjunto de una membrana de presión, que mide la altura de la lámina de agua en el canal, y un emisor-receptor de ondas de alta frecuencia, que relaciona el efecto Doppler producido en la corriente con su velocidad. No se han encontrado referencias sobre el empleo de esta tecnología para el aforo de corrientes naturales en nuestro país, por lo que las conclusiones obtenidas pueden resultar de utilidad para otros investigadores y Administraciones interesados en la misma. El artículo recoge los motivos que han llevado a su selección, así como las ventajas e inconvenientes de las soluciones adoptadas frente a la aplicación de otras posibles técnicas de aforo, exponiendo los resultados y conclusiones obtenidos tras cuatro años de funcionamiento de las instalaciones. Finalmente se plantea la posibilidad de aplicar la tecnología Doppler al aforo de cauces de mayor entidad que los experimentados.

SELECCIÓN DE LAS CUENCAS EXPERIMENTALES

Para seleccionar las cuencas hidrológicas se requería que las mismas presentasen un régimen hidrológico natural, es decir, sin presencia de alteraciones debidas a la actividad humana, tales como regadíos, vertidos de zonas urbanas o explotación de las aguas subterráneas. Otro requisito fue que no presentasen precipitaciones en forma de nieve de manera habitual, puesto que los modelos propuestos no las consideran. Finalmente, también se tuvo en cuenta la proximidad de las mismas a la ciudad de Madrid, así como la existencia de un sistema viario adecuado que permitiese un fácil acceso a los puntos de aforo para realizar las labores de toma de datos y mantenimiento.

El resultado, tras varios viajes de reconocimiento a distintas cuencas preseleccionadas a partir de la cartografía 1/200.000 de la Comunidad de Madrid, fue la selección de dos cuencas que se ajustaban a los condicionantes expuestos. La primera es la cuenca de arroyo del Monte, que se localiza en el término municipal de Daganzo de Arriba y tiene una extensión aproximada de 7 km², sus suelos son de textura franco arcillo arenosa y predomina claramente el cultivo de cereal en año y vez. La segunda es la cuenca del arroyo de Valdelamasa, que localizada en los términos municipales de Madrid y Colmenar Viejo y tiene una extensión de 17 km², sus suelos son de textura franca y franco arenosa y se dedican a un uso mixto entre encinar adeshado y cereal en año y vez. La situación de estas cuencas así como sus modelos digitales del terreno se recogen en las figuras 1 y 2 respectivamente.



Figura 1. Localización de las cuencas seleccionadas



Figura 2. Modelos digitales del terreno de las cuencas seleccionadas

DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS Y EQUIPOS INSTALADOS EN LAS CUENCAS EXPERIMENTALES

Equipos para el registro de precipitaciones

La necesidad de conocer con precisión la distribución de la lluvia durante el evento nos hizo seleccionar pluviómetros de balancín con precisión de 0.1 mm.

Estos pluviómetros, que fueron instalados junto al punto de aforo de cada cuenca para poder registrar toda la información en un único sistema de almacenamiento digital de datos (*data-logger*), permiten medir la cantidad de precipitación totalizada durante el intervalo de tiempo comprendido entre dos lecturas sucesivas. De esta manera, si fijamos un intervalo de lectura suficientemente pequeño, podemos conocer como se distribuye la precipitación durante un evento, o lo que es lo mismo, la intensidad de precipitación en cada intervalo. El intervalo de lectura seleccionado ha sido de 15 minutos, valor que se ha considerado un buen acuerdo entre la precisión requerida para la evaluación de los modelos propuestos y el volumen de almacenamiento de datos disponible en el *data-logger*, que en bajo estas condiciones permite efectuar labores de mantenimiento y lectura de datos cada mes.

En un pluviómetro de balancín el agua que entra por la boca es conducida a uno de los depósitos de un conjunto de dos iguales separados por un eje horizontal. Cuando un depósito está lleno, el sistema bascula, el depósito cae, efectúa un contacto con un tope y vierte el agua; en estas condiciones al otro depósito le empieza a llegar el agua procedente de la boca, se llena y efectúa la misma operación. Estos depósitos del balancín se vencen con una masa tal que según las dimensiones de la boca equivalga a 0.1 mm de lluvia, que es la precisión del aparato. En los topes suele haber unos contactos que cierran un circuito eléctrico cuando cae sobre ellos el balancín, con lo que la cantidad de precipitación de 0.1 mm se convierte en una señal eléctrica y queda registrada.

Equipos para el registro de caudales

Para la construcción de la obra de aforo de caudales y la selección de la tecnología empleada nos encontramos con los siguientes condicionantes:

1. La necesidad de obtener una autorización administrativa por parte de la Comisaría de aguas de la Confederación Hidrográfica del Tajo. Esta institución condicionó la realización de obras en el cauce al hecho de que las mismas *“no supusiesen ningún obstáculo al normal transcurrir de las aguas”*. Detrás de esta limitación se encontraba la imposibilidad de construir aforadores de tipo vertedero o de tipo modular con realce de solera, puesto que el almacenamiento de agua que se produce en los mismos podría facilitar desbordamientos en el cauce durante las avenidas.
2. Los sistemas tradicionales de aforo de cauces naturales, basados en la construcción de curvas de gasto a partir de una serie de aforos directos (mediante molinetes o trazadores químicos) y la posterior relación de la medida de niveles con los caudales circulantes no respondía a las exigencias del estudio. Esta técnica exige la realización de aforos de la corriente durante una avenida para construir la curva de gasto y además ofrece poca precisión y la estabilidad temporal de las relaciones nivel-caudal.
3. El recubrimiento de hormigón de una sección del cauce, con el fin de fijar su geometría y aforar mediante la aplicación de la fórmula de Manning era una opción válida, pero no ofrece las garantías de precisión necesarias al requerir una determinación precisa del coeficiente de rugosidad de la obra de hormigón, que en campo resulta difícil de evaluar. Adicionalmente, la longitud del tramo a acondicionar para obtener condiciones de régimen uniforme durante las avenidas implicaba unas inversiones no asumibles en el proyecto.
4. La posibilidad de utilizar las tecnologías ofertadas por distintas casas comerciales, basadas en el método área-velocidad, suponía un aliciente ante la ausencia de experiencias e información sobre su aplicación al aforo de corrientes naturales en nuestro país.

Finalmente se identificaron dos técnicas de aforo adecuadas a los condicionantes expuestos:

1. La transformación de un tramo del cauce en un aforador modular mediante estrechamiento de los cajeros, ejecutado en hormigón, y combinado con la medida de calado por medio de un sensor de presión.
2. El aforo mediante un método área-velocidad, basado en un recubrimiento de hormigón para transformar la sección del cauce en una sección trapecial perfectamente controlada, y en el registro de la velocidad y el calado mediante sensores de efecto Doppler y de presión respectivamente.

El manifiesto interés de los responsables de la Sección de Aforos de la Confederación Hidrográfica del Tajo por conocer las posibilidades de la segunda tecnología en el aforo de corrientes libres,

así como el hecho de que el aforo de pequeños cauces naturales con esta tecnología ya estaba siendo aplicado con éxito en varias cuencas experimentales de Estados Unidos (Engel et al., 1999; Parker et al., 1995) y por la Administración mexicana (Pedraza, 2001), resultó en la presentación de un proyecto para realizar las obras de aforo mediante el método área-velocidad mediante el empleo de sensores de efecto Doppler y de presión. Este proyecto, con pequeñas modificaciones, fue aceptado por la Confederación Hidrográfica.

Las obras fueron ejecutadas durante el mes de enero de 1998 por la empresa TRAGSA, instante desde el cual se dispone de registros pluviométricos y foronómicos en ambas cuencas. Las obras realizadas en el arroyo del Monte y en el arroyo de Valdelamasa se muestran en las figuras 3 y 4 respectivamente. En ellas se puede observar la transformación del cauce natural en un canal de sección trapezoidal en hormigón armado de 4 m de longitud, con aletas en su entrada. En el extremo aguas abajo de la solera del canal se encuentra un pequeño escalón de 10 cm de altura, diseñado con el fin de que los sensores se encuentren siempre completamente sumergidos y registren información aunque el flujo circulante sea de muy pequeña magnitud.



Figura 3. Obra de aforo en la cuenca del arroyo del Monte



Figura 4. Obra de aforo en la cuenca del arroyo de Valdelamasa

Los sensores se encuentran embutidos en una probeta de resina sintética que se sitúa en el fondo del canal mediante unos herrajes de acero inoxidable, que permiten su extracción de una forma sencilla para las labores de limpieza (figura 5). El primer sensor que compone la probeta es una membrana de presión que mide la altura de agua sobre el canal por comparación con la presión atmosférica local. El segundo es un emisor-receptor de ondas de alta frecuencia, que relaciona el efecto Doppler producido en las ondas reflejadas por las partículas en suspensión con la velocidad media del flujo en la sección.



Figura 5. Probeta con los sensores y cable de conexión con el data-loggers

El conocimiento del nivel del agua sobre un canal de sección conocida, cuya geometría se programa en el equipo de adquisición de datos introduciendo las coordenadas de los puntos que definen la sección, se emplea para calcular el área de la sección mojada. Este valor, junto con el de la velocidad media proporcionada por el sensor de efecto Doppler, nos permite obtener el caudal en cada instante.

Almacenamiento y manipulación de la información registrada

Tanto el pluviómetro de balancín como los sensores para la medida de caudales se encuentran conectados a un sistema de almacenamiento digital o *data-logger*. Los sensores realizan medidas cada 30 segundos, almacenándose la media correspondiente a cada intervalo de 15 minutos. La capacidad del sistema de almacenamiento permite registrar la información durante varios meses.

El factor limitante para fijar la frecuencia de la recogida de datos no ha sido la capacidad de almacenamiento, sino la autonomía de las baterías de 12 voltios que alimentan el equipo. Las baterías originales (de 12 Ah) apenas ofrecían suficiente capacidad para mantener el equipo en funcionamiento durante tres o cuatro días, por lo que fue necesario adaptar una batería de automóvil de 47 Ah.

De esta manera el equipo funciona automáticamente durante periodos de 30 días, tras los cuales se procede a la limpieza del canal y los sensores, al cambio de baterías y a la recogida de la información almacenada, que es volcada a un ordenador portátil. Tanto el *data-logger* como las baterías se ubican en un armario metálico diseñado al efecto, que también sirve de soporte para el pluviómetro (figura 6).



Figura 6. Armario metálico para el data-logger y la batería. Pluviómetro instalado

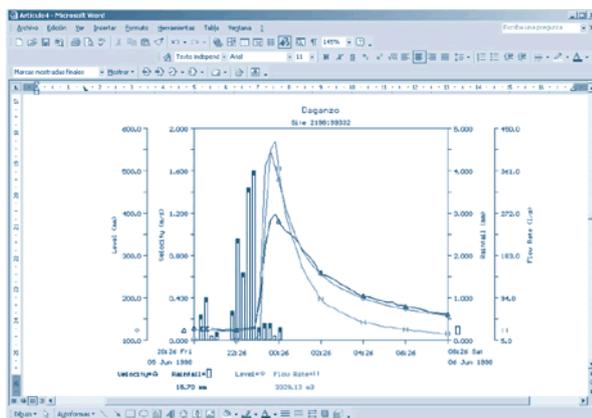


Figura 7. Representación gráfica de un evento registrado

El equipo de almacenamiento digital registra las variables de precipitación total en cada intervalo (mm), velocidad del flujo (m/s), altura de la lámina de agua (mm) y caudal (l/s). Esta información es recogida mediante software específico, que se encuentra instalado en un ordenador portátil y que está preparado para la comunicación con el equipo de almacenamiento digital mediante un cable de comunicaciones que se conecta a cualquier puerto serie del ordenador. Una vez recogida la información, ésta puede ser editada, representada y convertida a formatos compatibles con otros programas. En la figura 7 se muestra una representación gráfica de la información registrada durante uno de los eventos.

AFORO DE CORRIENTES CON SENSORES DE EFECTO DOPPLER

Se denomina efecto Doppler a la variación en la longitud de onda que se produce cuando las ondas electromagnéticas se reflejan en un objeto en movimiento. Esta variación es proporcional a la velocidad del objeto. Si se denomina f_1 a la frecuencia de la onda emitida, al reflejarse en una partícula con movimiento de velocidad v y de sentido contrario al avance de la onda, la frecuencia reflejada f_2 tendrá el valor $f_2 = f_1 + v/\lambda$, donde λ es la longitud de onda emitida. Por tanto, conocida la longitud de onda λ y la frecuencia emitida f_1 , así como la frecuencia recibida f_2 , se puede conocer la velocidad de una partícula mediante la expresión:

$$v = (f_2 - f_1) \cdot \lambda \quad (1)$$

Por tanto, si se instala un emisor-receptor de ondas de alta frecuencia en el seno de una corriente, se puede relacionar el efecto Doppler producido en las ondas reflejadas por las burbujas y partículas en suspensión con la velocidad del flujo en la sección (figura 8).

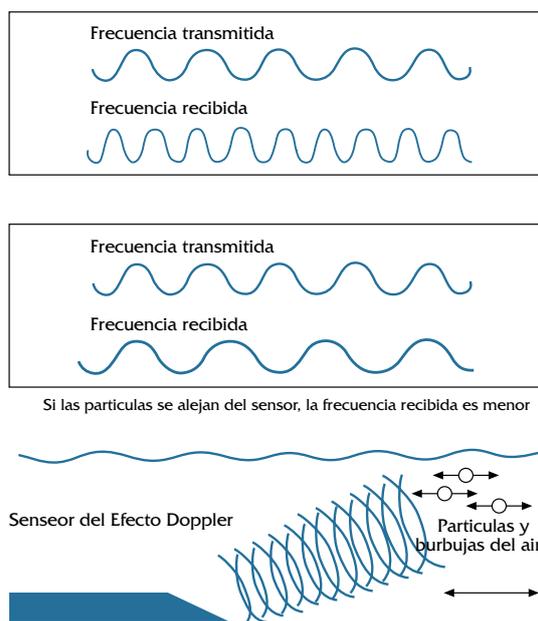


Figura 8. Relación efecto dopler-velocidad

Es importante remarcar que para la correcta medición de la velocidad de un flujo mediante esta tecnología se deben producir una serie de circunstancias:

- El flujo debe arrastrar partículas en suspensión, que además deben distribuirse uniformemente en la sección de aforo.

De esta forma se podrá asumir que la variación media en la frecuencia de las ondas recibidas representa la velocidad media de las partículas arrastradas por el flujo, y por tanto la velocidad media de dicho flujo.

- Puesto que el perfil de velocidades en una corriente abierta no es uniforme, el haz de ondas electromagnéticas debe barrer completamente la sección de aforos, con el fin de ponderar correctamente la velocidad en las diferentes zonas de la sección y obtener una velocidad media correcta. Para que esta ponderación sea adecuada también es imprescindible una distribución uniforme de las partículas.

- Debe realizarse una correcta alineación del emisor-receptor Doppler con la dirección del flujo. Éste debe quedar alineado tanto horizontal como verticalmente y orientado hacia aguas arriba. Cualquier inclinación en el plano horizontal reduce la precisión del sistema. Un ángulo α de 10 grados reduce la velocidad registrada un 1.5% respecto a la real:

$$\begin{aligned} \text{Alineación correcta } v &= (f_2 - f_1) \cdot \lambda & (2) \\ \text{Alineación incorrecta } v' &= v \cdot \cos\alpha = v \cdot \cos 10 = 0.985v \end{aligned}$$

Los errores más significativos ocurren cuando existe una inclinación en el plano vertical. El sensor está diseñado para proyectar ondas con un ángulo de 30 grados con respecto a la horizontal. Si el sensor está colocado con un ángulo de 10 grados en el plano vertical, se presenta un error aproximado del 10% en la medición de la velocidad.

- La transmisión de las ondas en un fluido se ve afectada por sus propiedades físicas, principalmente temperatura y viscosidad, y en menor medida por la presión. Por esta circunstancia los sensores Doppler sólo presentarán las precisiones indicadas por los fabricantes si se emplean dentro de los rangos recomendados para estas variables.

- Aunque en nuestra aplicación no se requería, la tecnología empleada permite registrar flujos en corrientes que cambian de sentido y también se puede emplear en condiciones de carga, situación en la que no es necesario el sensor de presión para aforar la corriente.

Los fabricantes y catálogos comerciales consultados indican que, si se tienen en cuenta las consideraciones anteriores, se alcanzan precisiones del 2-3% en la medida de velocidad del flujo.

Con el fin de contrastar esta calidad teórica de las medidas se realizó un ensayo en el laboratorio de Hidráulica de la E.T.S.I. Agrónomos de Madrid.

En este ensayo se compararon los caudales registrados por un caudalímetro de ultrasonidos, un vertedero triangular y un canal de sección trapecial, semejante a los construidos en las obras de aforo, donde se instalaron los sensores descritos previamente para su evaluación.

La instalación, según se muestra en la figura 9, formaba un circuito cerrado alimentado desde un depósito regulador por una bomba. Situado a una distancia de 4 m con el fin de evitar interferencias producidas por la bomba, se situó el caudalímetro de ultrasonidos, cuyo principio de operación es la medida del tiempo de tránsito de las ondas y cuya precisión estaba fijada en el 1%. A continuación el agua alcanzaba un depósito y, tras atravesar unos tranquilizadores, circulaba por el vertedero triangular, donde se controlaba el nivel mediante piezómetros graduados. Finalmente se encontraba un canal trapecial semejante a los instalados en campo, pero de dimensiones menores, donde se medía el calado con el sensor de presión y la velocidad con el sensor Doppler, obteniéndose el caudal circulante.

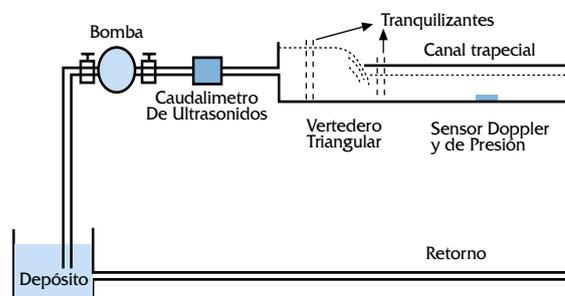


Figura 9. Esquema de la instalación empleada para evaluar la tecnología de aforo

Para efectuar las medidas se operaba sobre la válvula situada a la salida de la bomba, con el fin de establecer distintos caudales entre 0 y 50 l/s (máximo admisible en la instalación). Tras esperar a la estabilización de las medidas en los distintos caudalímetros se registraban las mismas y se procedía a operar de forma semejante con un nuevo caudal. Los resultados se recogen en la tabla 1 y cabe destacar que los errores se situaron siempre por debajo del 4% y que la medición efectuada por el equipo evaluado fue inferior a la registrada por el vertedero y por el de ultrasonidos, excepto para caudales muy pequeños.

Tabla 1. Resultados del ensayo de laboratorio del aforador por efecto Doppler

Doppler (l/s)	Vertedero (l/s)	Error (%)	Ultrasonidos (l/s)	Error (%)
1.58	1.55	1.9	1.43	9.6
6.62	6.50	1.8	6.40	3.4
12.58	12.56	0.1	12.36	1.7
14.52	14.84	-2.2	14.62	-0.6
15.06	15.21	-1.0	14.98	0.04
18.27	18.57	-1.6	18.29	-0.1
18.72	19.26	-2.8	18.96	-1.3
18.79	19.28	-2.5	18.99	-1.0
19.75	19.80	-0.3	19.50	1.3
26.61	27.25	-2.3	26.83	-0.8
29.98	31.05	-3.4	30.58	-1.9
32.85	33.94	-3.2	33.43	-1.7
39.75	40.91	-2.8	40.29	-1.3
43.02	44.67	-3.6	43.99	-2.2
46.17	47.79	-3.4	47.06	-1.9
48.03	49.68	-3.3	49.13	-2.2

Un hecho significativo es que el agua tenía una apariencia limpia, sin ningún tipo de sólidos en suspensión añadidos al efecto y sin partículas observables a simple vista, a pesar de lo cual el sensor Doppler no presentó ningún problema para el registro de la velocidad. Tampoco se detectó efecto alguno de la calidad del agua sobre el caudalímetro de ultrasonidos basado en la medida del tiempo de tránsito.

Con el fin de reproducir lo más fielmente posible las condiciones de funcionamiento en las cuencas experimentales, donde se espera registrar caudales de hasta 1000 l/s (correspondientes a periodos de retorno de 5 años), resultaba conveniente evaluar los equipos con caudales de mayor magnitud, para lo cual se contactó con personal del Centro de Estudios Hidrológicos, perteneciente al Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, donde se dispone de un laboratorio adecuado para estos fines. Sin embargo, los canales para grandes caudales de dicho laboratorio son de sección rectangular y sus instalaciones sólo estuvieron disponibles cuando los equipos ya se encontraban instalados en campo, circunstancias por las que finalmente no se realizó una evaluación para valores altos de caudal.

CONSIDERACIONES PRÁCTICAS SOBRE LAS INSTALACIONES DE AFORO DE LAS CUENCAS EXPERIMENTALES

En primer lugar hay que destacar que el diseño de las obras ha sido plenamente satisfactorio puesto que hasta el momento no ha sido necesario realizar

ninguna actuación significativa para la corrección o mantenimiento de las mismas, a pesar de haber estado sometidas a eventos con caudales punta superiores a los 600 l/s. Esta circunstancia es importante, puesto que es habitual que en las obras de aforo de corrientes naturales se produzcan numerosos problemas por erosión remontante aguas abajo de la obra y por soterramiento de la misma, consecuencia de la sedimentación y arrastres del cauce durante las crecidas, circunstancias bastante frecuentes en vertederos y aforos modulares mediante realce de solera. La realización de las obras tampoco ha supuesto ningún desbordamiento de los cauces en los puntos de actuación, satisfaciendo los requisitos impuestos por la Confederación Hidrográfica. El diseño de un pequeño escalón de 10 cm en el extremo aguas abajo de la solera del canal permite mantener sumergidos los sensores aunque los caudales circulantes sean muy pequeños. De esta forma se pueden registrar valores de caudal muy pequeños (de hasta a 0,1 l/s), que de no existir dicho escalón no serían detectados por los sensores. Sin embargo, como se comenta posteriormente, este escalón ha sido la causa de ciertos problemas por sedimentación y crecimiento de algas sobre los sensores.

Las principales ventajas encontradas mediante el empleo combinado del sensor Doppler junto al de presión para el aforo de cauces naturales han sido las siguientes:

- La aparente pureza y limpieza que presentaban las aguas en los cauces aforados, fuera de los periodos de crecida, planteaba la posibilidad de un mal funcionamiento del sensor Doppler.

Sin embargo, el registro de velocidades ha sido continuo y no se ha visto afectado por esta circunstancia.

- Su instalación no requiere la ejecución de obras que supongan un obstáculo al normal transcurrir de las aguas, evitando problemas de erosión y soterramiento frecuentes en otro tipo de estructuras.

- Los sensores empleados no presentan partes móviles, por lo que apenas ofrecen oposición al flujo, minimizando las pérdidas de carga y las alteraciones sobre la lámina de agua.

- Requiere poco mantenimiento, siendo únicamente necesario calibrar el sensor de presión y limpiar la probeta en cada una de las operaciones de mantenimiento. Los sensores Doppler se suministran calibrados por los fabricantes y ofrece un correcto funcionamiento durante largo tiempo, siempre y cuando no existan daños físicos sobre el mismo.

- La precisión de las sondas instaladas es de ± 0.03 m/s en la de velocidad para un rango de -2 a 2 m/s y de ± 1 mm en la de presión. Estas características permiten mantener los errores de medida por debajo de 5% en un amplio espectro de caudales y calados, precisión que en condiciones de laboratorio puede considerarse baja (Larreategui, 1994), pero que para la mayor parte de estudios hidrológicos resulta satisfactoria.

Desde un punto de vista teórico, el principal inconveniente del empleo de la tecnología Doppler es la incertidumbre de la corrección en las medidas asociada a la heterogeneidad del perfil de velocidades en la sección de aforo. Resulta razonable pensar que los registros del sensor variarán con su posición en la sección transversal al flujo de la misma forma que lo hacen las líneas isotacas. De igual modo crea incertidumbre el hecho de aforar una corriente que puede tener variaciones significativas en el calado con un único sensor situado en el fondo del canal, puesto que conforme aumenta el calado, el número de partículas de las capas altas del fluido considerado a la hora de estimar la velocidad sea menos representativo, produciendo mediciones por defecto. Esta circunstancia puede justificar el hecho de que los errores de aforo en el ensayo realizado sean por defecto, y crezcan conforme aumenta el calado en la sección. Sin duda este es un campo de experimentación necesario para conocer las verdaderas posibilidades de la tecnología Doppler en el aforo de corrientes libres.

Desde un punto de vista práctico las instalaciones de las cuencas experimentales han planteado los siguientes inconvenientes:

- El primero está relacionado con la sedimentación que se produce en el canal de hormigón tras cada evento, que en ocasiones llega a enterrar el sensor localizado en el fondo del canal. En estas condiciones sólo se registran medidas de nivel de agua. El problema desaparece con el incremento de velocidad en el flujo que se produce durante el inicio de cada evento, que arrastra los sedimentos depositados y permite registrar los datos correctamente. Este problema sólo ha aparecido en la cuenca del arroyo de Valdelamasa, que tiene un lecho arenoso.

- El segundo está relacionado con el crecimiento de algas sobre el sensor durante los meses más calurosos. Con las altas temperaturas estivales se produce una mayor proliferación de algas, que unido a la disminución de la magnitud de los caudales hace que las mismas tapicen el fondo del canal, donde se encuentran instalados los sensores. Estas algas impiden la medida de la velocidad del flujo por efecto Doppler. El problema también desaparece con el incremento de velocidad que se produce durante el inicio de cada evento, que limpia el sensor y el canal.

- El último problema detectado está relacionado con la aparición de una capa de hielo sobre la corriente, asociada a las bajas temperaturas invernales y a flujos de pequeña magnitud. Bajo estas condiciones el sensor Doppler sigue registrando medidas de velocidad, pero el sensor de presión puede falsear las medidas de caudal dado que la cobertura de hielo impide la normal oscilación del nivel de agua en el canal, dando lugar a un flujo en condiciones forzadas. Bajo estas circunstancias el sensor de presión puede registrar una lámina de agua mayor a la que realmente se está produciendo.

POSIBLE APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DOPPLER AL AFORO DIRECTO DE CAUCES MAYORES

El aforo de cauces de ríos se ha abordado tradicionalmente mediante el establecimiento de curvas de gasto (niveles-caudales) a partir de la realización de aforos directos. De esta forma el aforo del río se reduce a la medida de un nivel respecto a una referencia fija denominada escala o limnómetro.

La precisión de esta técnica depende en gran medida de la calidad de los aforos directos con los que se ha definido la curva de gasto.

Por aforo directo se entiende el conjunto de operaciones realizadas en un río para calcular el caudal circulante en un momento determinado, anotando al mismo tiempo la altura en la escala limnimétrica. La realización de esta operación para distintos niveles de la lámina de agua nos permite obtener la mencionada curva de gasto. Conforme aumenta la sección transversal de un cauce y la complejidad de su forma se producen mayores variaciones de velocidad en la misma, de forma que su aforo mediante la medida de la velocidad en un punto no es válido. Por este motivo el aforo directo de cauces mayores se realiza mediante la medición de las velocidades a lo largo de varias verticales trazadas de forma equidistante en la sección, con el fin de obtener la denominada "superficie de caudal" o "sólido de velocidades" (Nuno y Mimoso, 1988). El caudal resultante se obtiene por integración de estas velocidades puntuales a lo largo de la sección.

La medida de la velocidad en los distintos puntos de la sección transversal se realiza mediante el empleo de molinetes tarados experimentalmente. Estos instrumentos constan de un cuerpo principal portador de una hélice y de un contador electrónico de velocidades. Pueden introducirse en el agua sujetos a una barra graduada o por medio de un cable lastrado que se suelta con un torno desde puentes o pasarelas. Los errores de los molinetes bien calibrados se sitúan en torno al 3%. La velocidad v de la corriente se mide dejando el molinete fijo en un punto durante T segundos y contando las revoluciones N de la hélice mediante el contador. Con estos datos se emplean expresiones obtenidas experimentalmente del tipo:

$$v = a \cdot \frac{N}{T} + b \quad (3)$$

Existe la posibilidad de sustituir los molinetes por una cápsula con un sensor Doppler embutido, de forma similar al empleado en las cuencas experimentales, y emplearlo sujeto a una barra graduada con el fin de obtener la velocidad media en los distintos puntos de la sección del cauce. El sensor Doppler no mide la velocidad de un punto, sino de una zona, pero esto no representa un problema puesto que el método de integración asume que las velocidades puntuales registradas son las representativas de cada zona de la sección transversal.

Únicamente se ha encontrado una referencia de la aplicación de la tecnología Doppler al aforo de ríos en Alaska (Host, 1999), en la que se indica como principal ventaja la facilidad de manejo, puesto que se trata de un elemento de menor tamaño, más ligero y que ofrece mucha menor resistencia a la corriente, por lo que su empleo, sobre todo en condiciones de avenida, puede resultar mucho más sencillo que los molinetes tradicionales.

Otra ventaja teórica es la rapidez de medidas. Al contrario que los molinetes, los sensores Doppler pueden medir la velocidad del flujo de forma instantánea. Este hecho supone un importante ahorro de tiempo que lleva asociado una mayor precisión a la hora de aforar una sección en condiciones de flujo variable (como ocurre durante las avenidas), puesto que el tiempo requerido para realizar todas las medidas será mucho menor, y por tanto también la variación en el calado.

Como principal inconveniente teórico del sistema destaca la incertidumbre asociada a la elevada turbulencia de los flujos durante las avenidas. En estas condiciones la velocidad de las partículas puede no ser representativa de la velocidad media del flujo, por lo que la precisión del sistema de medida puede verse notablemente afectada. A pesar de que los sensores Doppler que se comercializan actualmente indican precisiones inferiores al 3%, que son las proporcionadas por los molinetes en el mejor de los casos, sería poco probable alcanzarlos. Sin embargo, cualquier tipo de aforo en condiciones de avenida ofrece grandes incertidumbres.

CONCLUSIONES

Se ha constatado que la monitorización hidrológica de cuencas naturales ofrece numerosas dificultades, tanto técnicas como administrativas, y que existe una ausencia total de este tipo de instalaciones en nuestro país, por lo que resulta difícil evaluar modelos hidrológicos.

El empleo de un método de aforo área-velocidad, basado en la medida de la velocidad del flujo mediante un sensor por efecto Doppler, es una opción válida para la obtención de datos hidrológicos en cuencas experimentales, donde las precisiones exigidas no son elevadas. La correcta aplicación de esta tecnología presenta bastantes requisitos técnicos y de manejo, pero ofrece una gran versatilidad y evita la necesidad de disponer de obras que obstaculicen el normal transcurrir de las aguas en los cauces.

Las instalaciones descritas ofrece un funcionamiento satisfactorio para el registro de avenidas, pero puede plantear dificultades en el registro continuo de datos como consecuencia de la necesidad de frecuentes labores de limpieza para evitar los problemas de sedimentación de partículas y crecimiento de algas sobre el sensor. Estos problemas desaparecen al inicio de un evento hidrológico, por lo que éstos son registrados correctamente.

La tecnología Doppler también puede suponer una alternativa al empleo de molinetes en el aforo directo de cauces mayores.

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Constante
b	Constante
f_1	Frecuencia de la onda emitida
f_2	Frecuencia de la onda recibida
N	Número de revoluciones del molinete
T	Tiempo
v	Velocidad del flujo
α	Ángulo de inclinación entre el eje del sensor y la dirección de la corriente en el plano horizontal
λ	Longitud de onda emitida

REFERENCIAS

- Bos, M.G., Replogle, J.A. y Clemmens, A.J., 1984, "Flow Measurements Flumes for Open Channel Systems", John Willey & Sons, E.E.U.U.
- Domínguez, J.; Losada A.; Roldan, J. y Alcalde, M. 1984, "Curvas de gasto por aforo modular", I.N.I.A. Serie General nº14.
- Engel, B., Maguerra, H., Kosky, K., Foster, S., Spacie A. y Parker, G., 1997, "Hydrologic and Water Quality Data Acquisition and Monitoring in the IndiaPine Watershed, Indiana", Paper nº 972155, 1997 ASAE Annual Meeting, Minneapolis, E.E.U.U. Grant, M. y Dawson, B., 1996, "ISCO Open Channel Flow Measurement Handbook", ISCO Environmental Division, Lincoln, Nebraska, E.E.U.U.
- Hardy, J.E., Hilton, J.O., McKnight, T.E., Remenyik, C.J. y Ruppel F.R., 1998, "Flow Measurement Methods & Applications", John Willey & Sons, E.E.U.U.
- Host, R., 1999, "Use of Acoustical Doppler Current Profiles in remote Areas of Southeast Alaska", <http://il.water.usgs.gov/adcp/alaska/index.html>.
- Larreategui, A., 1994, "Estado del arte en la medición de magnitudes hidráulicas", Ingeniería del Agua, Vol. 1, nº2, pp 33-68.
- Martínez, V., 1999, "Simulación y comprobación experimental de la escorrentía superficial en pequeñas cuencas no aforadas mediante modelos distribuidos implementados sobre SIG", Tesis Doctoral, Departamento de Construcción y Vías Rurales, Universidad Politécnica de Madrid.
- Martínez, V., Dal-Ré, R., Ayuga, F. y García, A.I., 1999, "Hydrologic monitoring and development of distributed models in a GIS environment in order to evaluate surface runoff in ungaged rural watersheds", ASAE Paper Nº 992109, ASAE/CSAE Annual International Meeting, Toronto, Canadá.
- Miller, R.W., 1996, "Flow Measurement Engineering Handbook", McGraw-Hill, E.E.U.U.
- Nuno, J. y Mimoso, L., 1988, "Analysis of some velocity-area methods for calculating open channel flow", Hydrological Sciences, Vol. 33, nº3, pp 311-318.
- Parker, G., Engel, B. y Spacie, A., 1995, "A Completion Report on the Indiana Pine Pilot Watershed Project", Annual Report to the Indiana Department of Natural Resources, Purdue University, Indiana, E.E.U.U.
- Pedraza, G.E., 2001, "Medidor Ultrasónico de Efecto Doppler para Canales". Comisión Nacional del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México.
- United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1985, "National Engineering Handbook, Section 4, United States Government Printing Office, Washington D.C., E.E.U.U.