

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Desarenadores fluidicos de tubo de vórtice: un estudio experimental.
<i>Autor / Adscripción</i>	Aldo I. Ramírez Roberto Mejía Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Juan Antonio Blanco Figueroa Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Celaya, Guanajuato, México
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 22(2): 69-80
<i>Fecha de publicación</i>	2007
<i>Resumen</i>	El desarenador fluidoico de tubo de vórtice es un dispositivo utilizado para la extracción de sedimentos de cauces o canales. El funcionamiento del dispositivo se evalúa por medio de la eficiencia de atrapamiento, la cual se define como la relación entre el gasto sólido extraído y el gasto sólido total transportado, y por la eficiencia de extracción, que se define como la relación entre el gasto líquido extraído a través del tubo y el gasto líquido conducido por el cauce. En este artículo se presentan los resultados de pruebas experimentales llevadas a cabo en un desarenador de este tipo en el laboratorio Enzo Levi del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/849

Desarenadores fluídicos de tubo de vórtice: un estudio experimental

Aldo I. Ramírez
Roberto Mejía

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Juan Antonio Blanco-Figueroa

Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Celaya, Guanajuato, México

El desarenador fluídico de tubo de vórtice es un dispositivo utilizado para la extracción de sedimentos de cauces o canales y está formado por un tubo con una ranura abierta a lo largo de su parte superior instalado en el fondo del cauce. La mezcla de agua-sedimento que fluye cerca del vórtice que se forma en el interior del tubo. El funcionamiento del dispositivo se evalúa por medio de la eficiencia de atrapamiento, la cual se define como la relación entre el gasto sólido extraído y el gasto sólido total transportado, y por la eficiencia de extracción, que se define como la relación entre el gasto líquido extraído a través del tubo y el gasto líquido conducido por el cauce. En este artículo se presentan los resultados de pruebas experimentales llevadas a cabo en un desarenador de este tipo en el laboratorio Enzo Levi del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Los resultados indican que se logran eficiencias de atrapamiento de hasta 94.9%, con relaciones de extracción que no sobrepasan el 10% en todas las pruebas realizadas.

Palabras clave: desarenadores, tubo de vórtice, estudio experimental, canales de riego, control de sedimentos, extracción de sedimentos.

Introducción

Las características fisiográficas, la cobertura vegetal, la constitución del suelo y la actividad humana son factores muy importantes en la producción de sedimentos de una cuenca. Por efecto de la lluvia, los sedimentos son transportados hasta las corrientes de agua, las cuales los transportan como carga de lavado, carga en suspensión, arrastre por el fondo o como una combinación de estos últimos. En la mayoría de los ríos importantes del mundo se llevan a cabo muestreos de sedimentos en forma sistemática, en general con una medición diaria.

Debido a la pendiente de los ríos, sobre todo en las partes correspondientes a las planicies, la baja velocidad de las corrientes produce la sedimentación o el depósito de los materiales sólidos aportados por las partes altas de la cuenca. La sedimentación de material sólido es también un asunto de consideración en el caso de canales de llamada hacia instalaciones generadoras

de energía o hacia las zonas de riego. La sedimentación puede causar una pérdida significativa en la capacidad de conducción de los canales de riego, la disminución del calado en puertos fluviales, el meandreo de corrientes, la obstrucción de la navegación, y la formación de barras en las confluencias de corrientes o su desembocadura, entre otros. En el caso de canales que suministran agua a centrales hidroeléctricas, el ingreso de sedimentos puede reducir la capacidad de conducción y, por tanto, el gasto líquido suministrado, abriendo incluso la posibilidad de dañar las turbinas (Atkinson, 1989).

En México, por ejemplo, los ríos Papaloapan y Grijalva se encuentran parcialmente azolvados en la zona de planicie. En estos casos, la acumulación de sedimentos genera una reducción de la capacidad hidráulica del río, de tal forma que cuando se presentan precipitaciones intensas, el escurrimiento asociado no puede ser conducido por las secciones reducidas de los cauces, produciendo severas inundaciones. Aparicio *et al.* (1994)

mencionan que en la cuenca del río Papaloapan cerca de 14 millones de metros cúbicos anuales de sedimentos provenientes de todos sus afluentes llegan a la zona de planicie, mientras que el río Colorado deposita anualmente 233 millones de toneladas de limo en el lago Mead (Uppal, 1966). Por otro lado, las presas construidas sobre cauces que transportan grandes cargas de sedimento se pueden azolver en corto tiempo.

En el caso de los canales de alimentación a sistemas de riego, los problemas de sedimentación son comunes, ya que éstos se diseñan con gradientes bajos para operar a velocidades reducidas, a fin de evitar la erosión del fondo y las paredes. Con la acumulación de sedimentos se reduce la capacidad de conducción y, por lo tanto, el gasto que se deriva hacia las parcelas. Para que los canales sigan siendo funcionales, los sedimentos deben extraerse en forma regular, ya sea de manera manual o mecánica. El costo de este desazolve depende por supuesto de la magnitud del problema; sin embargo, éste representa sin duda el mayor de los costos de operación y mantenimiento de los canales, sin mencionar por supuesto que el canal puede incluso dejar de operar por largos periodos.

En muchos lugares que presentan esta problemática, el control de la acumulación de sedimentos se ha realizado mediante trabajos de extracción de sedimento o dragado, el cual presenta tres inconvenientes: el alto costo, la utilización de periodos de mantenimiento muy largos y la posible afectación del entorno ecológico.

Como ejemplo, Uppal (1966) consigna que el río Colorado transportó tal cantidad de sedimentos en 1923 que los trabajos de dragado a lo largo de la corriente se extendieron por cerca de ocho años, con un costo anual promedio de más de 78 millones de dólares.

Por otro lado, un estudio del organismo inglés *Overseas Development Administration*, en Java del Este, muestra que el 46% del presupuesto de operación y mantenimiento de un sistema de riego que abastece a cerca de un millón de hectáreas en ese país se destina a labores de desazolve de los canales (HR Wallingford, folleto informativo).

En general, la carga de sedimentos que transportan los ríos va en aumento. Como ejemplo, se sabe que la concentración de sedimentos de agua derivada del río Nilo hacia el sistema de riego de Gezira, en Sudán, se ha cuadruplicado en los últimos cincuenta años. Los datos disponibles indican que el transporte de partículas sólidas puede aumentar hasta en un 50% cada década (http://www.dfid-kar-water.net/w5outputs/sediment_control_slides.htm). Este hecho seguramente se reflejará en la necesidad de alternativas más eficaces para el control de los sedimentos en ríos y canales.

La mejor alternativa parece ser que los sedimentos sean controlados lo más cerca posible de su origen y evitar así que lleguen a las zonas de potencial sedimentación. Este control puede efectuarse mediante la conservación de la cuenca, ya que la cobertura vegetal brinda protección a la superficie del suelo contra la acción del viento y la lluvia. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos que puedan llevarse a cabo para el control de la erosión de las cuencas, ésta no puede detenerse completamente, de tal forma que los sedimentos deben considerarse como una parte integral de las corrientes, lo que lleva a establecer su control en las obras de toma.

En este trabajo se revisan algunas opciones de control de sedimentos en ríos y canales, y se presentan los resultados de un estudio experimental de laboratorio sobre el desempeño de los denominados desarenadores fluídicos de tubo de vórtice.

Si bien los desarenadores fluídicos de tubo de vórtice han sido estudiados en el pasado, los ensayos de laboratorio en un canal experimental permiten lograr un mejor entendimiento del fenómeno y confirmar las aseveraciones mencionadas en la literatura. Asimismo, los resultados proporcionan elementos importantes sobre la facilidad de su instalación y operación en condiciones reales. Esta es precisamente la justificación y el objetivo del presente estudio.

El control de sedimentos en ríos y canales

La sedimentación en canales puede reducirse en buena medida si las estructuras desarenadoras se incorporan en la entrada del propio canal. Hay muchas opciones para el control de los sedimentos, algunas mucho más costosas que otras, dependiendo de las condiciones locales, como el tamaño y la granulometría de los sedimentos, o de si existe un exceso de agua disponible para la remoción hidráulica de los mismos mediante el arrastre. Básicamente existen tres medios para el control de la acumulación de sedimentos en un canal. Estas opciones pueden aplicarse tanto a nuevos sistemas en etapa de diseño o a existentes cuando se ha planteado su rehabilitación. Las alternativas de control son (Atkinson, 1989):

- a) Llevando a cabo trabajos rutinarios de desazolve en forma mecánica o manual.
- b) Reduciendo o anulando la concentración del sedimento de ingreso (exclusión del sedimento).
- c) Atrapando y extrayendo el sedimento en el canal, pero antes de que pueda sedimentarse y causar problemas. Usualmente éste se hace cerca de la entrada del líquido al canal (extracción del sedimento).

La primera de las alternativas enumeradas se utiliza en raras ocasiones, ya que no es viable cuando se tienen grandes cantidades de sedimento en el canal. La segunda alternativa lleva consigo problemas de operación, pues todo el trabajo de remoción se lleva a cabo en la sección de entrada al canal. Este trabajo se centra en la tercera de las alternativas mencionadas.

Entre las estructuras para el control de sedimento correspondientes a la tercera de las opciones se encuentran los tanques de sedimentación, los eliminadores de sedimento con base en vanos de vórtice, y los desarenadores fluidicos de tubo de vórtice. Los métodos para el diseño de estas estructuras de basan principalmente en estudios de modelos físicos, de los cuales se han obtenido parámetros empíricos de diseño (Atkinson, 1994b).

Los tanques de sedimentación remueven tanto carga de fondo como carga en suspensión. Consisten en una sección de gran tamaño, en la cual la velocidad es lo suficientemente baja como para permitir que las partículas en suspensión se sedimenten y después removerlas por medios mecánicos o fluidicos (Hufferd *et al.*, 1977). Debido a su tamaño y alto costo, este tipo de obras está casi en desuso para remover sedimento en canales de riego y podría justificarse solamente para sistemas de agua industrial o doméstica.

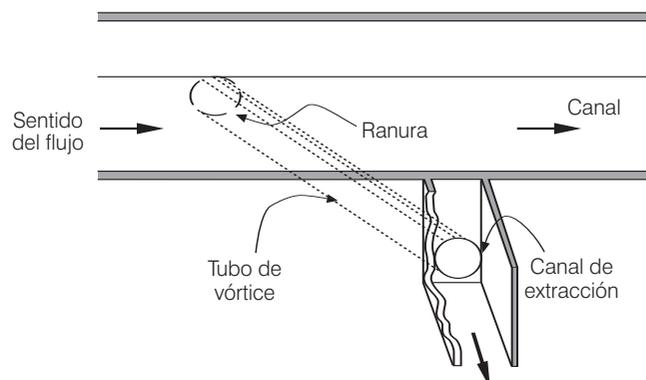
Un eliminador de sedimentos con base en vanos de vórtice previene que ingrese una carga excesiva a las tomas de riego donde no hay posibilidad de operar otras estructuras de control convencionales. Este dispositivo consiste en dos vanos verticales construidos sobre el fondo del río inmediatamente aguas arriba del canal de entrada. El vórtice entre los vanos es el resultado de movimiento del agua fluyendo dentro de éstos. Aunque este tipo de vanos se han usado en aplicaciones reales (Odgaard y Wang, 1991a y 1991b), existe poca documentación en cuanto a su diseño y funcionamiento.

Uno de los métodos más económicos para el control de sedimento es el desarenador fluidico de tubo de vórtice, el cual funciona extrayendo el sedimento de la capa de fondo del flujo en un canal. En este artículo se presentan los resultados experimentales del funcionamiento de este tipo de estructuras en laboratorio.

Desarenador fluidico de tubo de vórtice

Un desarenador fluidico de tubo de vórtice es un dispositivo que consiste en un tubo cerrado en uno de sus extremos, colocado en el fondo del canal en forma perpendicular o en un ángulo de incidencia o esviamiento con respecto a la dirección principal del flujo. El tubo tiene una ranura abierta a lo largo de su parte superior, la cual

Ilustración 1. Desarenador fluidico de tubo de vórtice (adaptada de Atkinson, 1994a).



se hace coincidir con una ranura de iguales dimensiones en el propio fondo del canal (ilustración 1). Con esta disposición, el flujo cercano al fondo del canal se recoge en el tubo de vórtice y se extrae por una margen hacia un canal de extracción. La mezcla agua-sedimento atrapada por el tubo se remueve por medio del vórtice forzado que se forma en su interior, fenómeno que, en general, previene que el tubo se obstruya y que precisamente propicia la denominación del dispositivo (ilustración 2). El flujo dentro del desarenador no es un flujo a presión, ya que, para un correcto funcionamiento, el vórtice se debe desarrollar completamente, dejando en el eje del mismo una vena de aire. El desarenador se instala sin desnivel entre sus extremos, pues esto no es necesario para generar el flujo hacia el exterior.

Los desarenadores fluidicos de tubo de vórtice tienen su aplicación principal en canales de sistemas de riego, en los que el agua desviada desde el río tiene altas concentraciones de sedimento de fondo. En este caso, el desarenador fluidico reduce la concentración de sedimento que entra al sistema de riego y la mezcla agua-

Ilustración 2. Desarenador fluidico de tubo de vórtice. Corte (adaptada de Atkinson, 1994a).

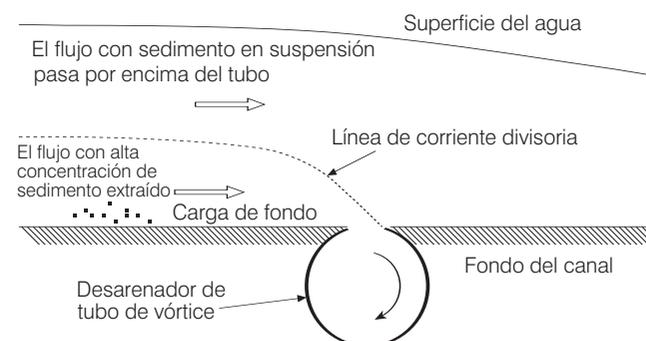
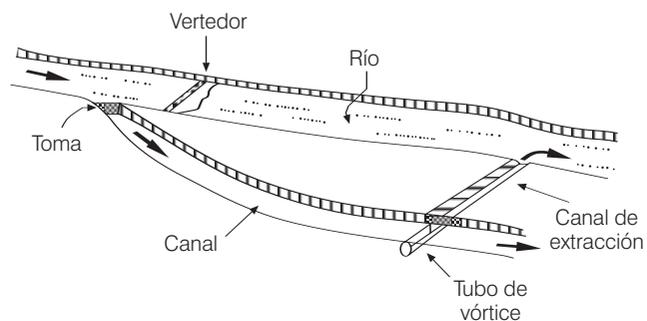


Ilustración 3. Bosquejo típico para un desarenador fluidico de tubo de vórtice (adaptada de *Design manual for canal sediment extractors*, volumen I, 1993).



sedimento expulsada a través del canal de extracción puede devolverse al río en cuanto las condiciones topográficas lo permitan. Normalmente, los tubos de vórtice se colocan en las cabeceras de los canales, donde se puede desviar agua adicional para operar el desarenador y se tiene la carga disponible para que el agua y el sedimento extraído puedan llevarse de nuevo al río, donde no se cause problemas (ilustración 3).

Los desarenadores fluidicos de tubo de vórtice no son una solución universal para los problemas de sedimentación de cauces; sin embargo, frecuentemente representan una solución más barata, comparada con la proporcionada por otros dispositivos de control de sedimentos. Además, la operación de estos dispositivos es relativamente sencilla y no implica tampoco el desvío de grandes caudales fuera del canal. De hecho, Atkinson (1994a y 1994b) reporta que en la mayoría de los casos los sedimentos de fondo de un cauce pueden extraerse en gran medida usando entre el 10 y el 20% del escurrimiento total en volumen.

La idea de utilizar un tubo de vórtice como dispositivo de control de sedimentos fue introducida originalmente por Crump (Atkinson 1994a). Las investigaciones iniciales consistieron principalmente en estudios de laboratorio con modelos a escala que ayudaron a explicar el comportamiento de los tubos de vórtice y permitieron el desarrollo de algunos criterios de diseño. La efectividad de un tubo de vórtice es producto de dos fenómenos distintos: el tipo de flujo espacialmente variado en el tubo y la forma en que se realiza el transporte de los sedimentos aguas arriba. Ya que es muy difícil escalar estos fenómenos simultáneamente en estudios de modelo físicos a pequeña escala, los resultados de modelos deben usarse con precaución cuando los resultados se extrapolan a escalas mayores. Por dicha razón, en este trabajo se lleva a cabo un estudio experimen-

tal en un canal *ad hoc* a escala real y no en un modelo hidráulico de escala reducida.

De acuerdo con Atkinson (1994a), Mahmood presentó un modelo analítico para el flujo a través de tubos de vórtice; desafortunadamente, en el documento no se incluyeron las recomendaciones de diseño.

La compañía inglesa HR Wallingford ha llevado a cabo las investigaciones básicas relacionadas con el uso de desarenadores de tubo de vórtice y ha planteado las ecuaciones fundamentales para el diseño hidráulico de tales dispositivos, incluyendo su dimensionamiento, la localización del tubo y la predicción de la eficiencia en la remoción de sedimentos (Singh, 1983; Atkinson, 1989; Atkinson, 1990; Atkinson, 1994b; Russell, 1991).

Por otro lado, de acuerdo con información existente, se han instalado con éxito desarenadores fluidicos de tubo de vórtice en diferentes lugares del mundo, entre los que se encuentran el sistema de riego Warujeng-Kertosono, en Java del Este, y el Canal Chatra, en Nepal (Singh, 1983; Fish, 1985; Fish *et al.*, 1986); además de que se reportan instalaciones experimentales en el Laboratorio de Investigación de Sedimentos en la Universidad de Ciencia y Tecnología Chengdu, en Sechuan, China, y en la Universidad de Tecnología Amir Kabir, en Teherán, Irán (www.hrwallingford.co.uk).

Características de un desarenador fluidico de tubo de vórtice

Entre las características principales de un desarenador de tubo de vórtice se encuentran (ilustraciones 4 y 5):

- La longitud del tubo (L).
- El ángulo de incidencia o esviajamiento (ángulo formado entre el eje del tubo y la dirección principal del flujo en el canal) (θ).
- El ancho de la ranura del tubo (t).
- El diámetro del tubo (d).

Ilustración 4. Sección del tubo de vórtice normal al eje del tubo.

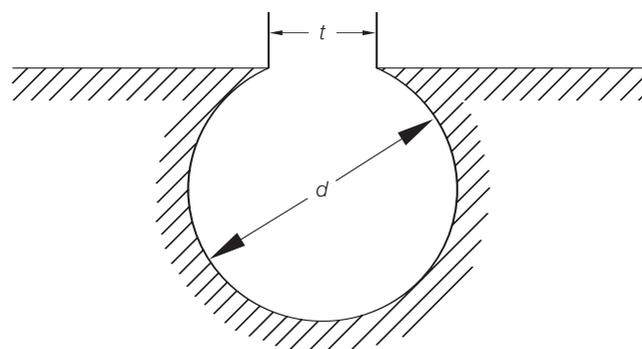
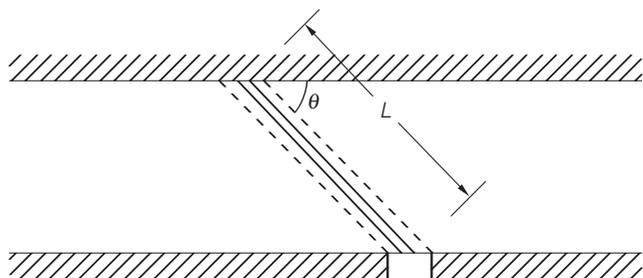


Ilustración 5. Colocación del tubo de vórtice (planta).



Funcionamiento de un desarenador fluidoico de tubo de vórtice

El funcionamiento de un desarenador fluidoico de tubo de vórtice queda especificado por dos parámetros: la eficiencia de atrapamiento y la relación de extracción (*Design manual for canal sediment extractors*, volumen I, 1993)

La eficiencia de atrapamiento de sedimentos, E , se define en porcentaje de acuerdo con la expresión siguiente:

$$E = \frac{\text{Cantidad de sedimento extraído del canal}}{\text{Cantidad de sedimento transportado por el canal aguas arriba}} \times 100$$

Por otro lado, la relación de extracción, W , está definida, también en porcentaje, como:

$$W = \frac{\text{Gasto desviado a través del desarenador fluidoico}}{\text{Gasto del canal aguas arriba del desarenador fluidoico}} \times 100$$

Los datos reportados por HR Wallingford, por ejemplo, para el caso del Canal Chatra, en Nepal, en el cual se instalaron tres tubos de vórtice de 0.90 m de diámetro y 4.80 m de longitud, colocados de tal forma que cubrirían los 14.4 m de ancho del canal, indican que la eficiencia de atrapamiento varió desde un 43.5 a un 57.5%, mientras que la relación de extracción osciló entre un 6.4 y 15.5%.

La eficiencia de atrapamiento puede mejorarse incrementando el número de Froude en la sección del canal donde está colocado el tubo de vórtice. Basados en observaciones de eficiencias de atrapamiento en modelos de laboratorio, Robinson y Ahmed recomiendan un número de Froude de aproximadamente 0.80 (Atkinson, 1994b). De acuerdo con Garde y Ranga Raju (1985), cuando en el canal no se alcanza el valor recomendado del número de Froude, la mejor alternativa para incrementarlo es estrechar el canal.

Un desarenador se debe instalar aguas abajo de las obras de toma donde la turbulencia haya decaído y se establezca un equilibrio en la concentración de sedimento en la vertical. Si el desarenador se coloca muy cerca de la toma, la eficiencia de atrapamiento del sedimento se reduce; mientras que si se instala demasiado lejos, se podría presentar sedimentación en el tramo intermedio. Las longitudes de adaptación recomendadas pueden encontrarse en el *Design manual for canal sediment extractors* (1993).

Factores involucrados en un estudio de desarenadores fluidoicos de tubo de vórtice

De acuerdo con Fang *et al.* (1990), un estudio experimental de desarenadores fluidoicos de cualquier tipo debe considerar diversos factores y variables en forma controlada, los cuales pueden, en general, agruparse en tres categorías:

- Factores que describen las características geométricas del tubo y el canal.
- Variables que describen al flujo.
- Variables que describen las características geométricas y físicas del sedimento transportado.

En este sentido, se han hecho diversas investigaciones, por ejemplo, variando la forma de la sección transversal, las elevaciones de los bordes de la ranura, etcétera. Hufferd *et al.* (1977) reportan que Parshall realizó estudios utilizando varias formas, tamaños y longitudes de tubos, encontrando, entre otras, las conclusiones siguientes:

1. Para un tubo de 4" (0.102 m) de diámetro, con una velocidad de 0.76 m/s, se obtuvieron relaciones de extracción entre el 10 y el 15%.
2. La velocidad de rotación en el vórtice fue de 200 rpm, aproximadamente, siendo capaz de mover gravas del tamaño de huevos de gallina.

Garde y Ranga Raju (1985) reportan que la máxima eficiencia se obtiene cuando ambos bordes del tubo están al mismo nivel y el número de Froude es cercano a uno. Asimismo, los autores establecen que si el tubo de vórtice es muy largo o la carga de sedimentos muy grande, el tubo podría bloquearse y dejar de funcionar. En este caso es preferible utilizar varios tramos ubicados en varias secciones cercanas entre sí sobre el canal.

Entre los estudios experimentales en desarenadores de tubo de vórtice se encuentran los realizados por Duo Fang (1990) en la Universidad de Ciencia y Tecnología de

Chengdu, en China, y los de M. Mohammadi en la Universidad de Teherán, en Irán. Con respecto al primero, Fang presenta algunas gráficas que relacionan los parámetros de funcionamiento de los desarenadores, dando recomendaciones específicas de diseño. Referente a la segunda referencia, desgraciadamente sólo se encuentra en persa, por lo que fue imposible consultarla con detalle.

Bases del estudio experimental

Los factores antes mencionados fueron tomados en cuenta en el estudio experimental, cuyos resultados se presentan en este documento. A continuación se describen las bases del estudio experimental y la instalación en laboratorio utilizada para realizar los diversos ensayos.

Con base en las investigaciones anteriores, se construyó un canal experimental de fondo fijo, con un sistema de alimentación de sedimento y sin recirculación de éste, a fin de llevar a cabo el estudio de laboratorio que permitiera evaluar el funcionamiento de los desarenadores.

El canal fue construido con este fin específico en las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica Enzo Levi del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en Jiutepec, Morelos, México.

De acuerdo con los antecedentes y las capacidades del laboratorio, se definieron las siguientes características del canal experimental:

$$Q_{\text{máx}} = 150 \text{ l/s}, B = 1.00 \text{ m}, S_0 = 0.0016, n = 0.010$$

Siendo $Q_{\text{máx}}$ el gasto máximo a conducir por el canal experimental; B , el ancho de plantilla; S_0 , la pendiente del fondo, y n el coeficiente de rugosidad. Con respecto a la selección de estos valores, se puede comentar que el gasto máximo está condicionado por la capacidad disponible en el laboratorio, en el cual, aún cuando se puede suministrar un máximo de 200 l/s, existían otros modelos hidráulicos en operación simultánea. Las variables geométricas del canal se eligieron bajo el siguiente razonamiento: el ancho unitario es común en los ensayos experimentales en canales debido a la facilidad de los cálculos, y a la ligera o nula influencia sobre los resultados, mientras que para la pendiente fue elegido un valor característico de los tramos de cauce con problemas de sedimentación excesiva, como los tomados del estudio del río Papaloapan (IMTA, 2000). El coeficiente de rugosidad de Manning fue determinado en laboratorio mediante el establecimiento de flujo uniforme y el planteamiento de dos secciones de medición.

Para estimar el gasto de fondo a usar en el canal experimental se analizaron datos procedentes de estudios de campo llevados al cabo por el IMTA en el río Papaloa-

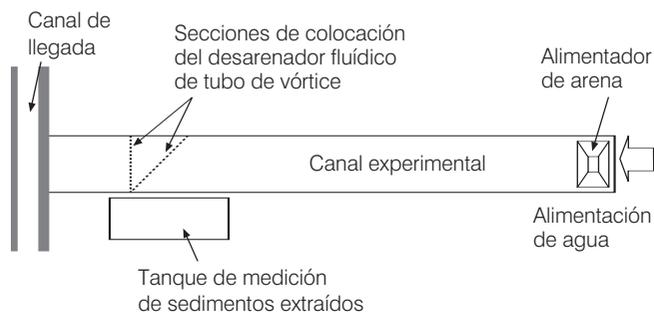
pan (IMTA, 2000). En este caso, se seleccionó la información correspondiente a la sección en la cual se localiza la estación hidrométrica Chacaltianguis, ya que en esa sección se dispone de datos tanto de la granulometría del material del fondo como de la hidrometría. Desgraciadamente no existen mediciones del transporte de los sedimentos en esa estación. Los datos utilizados para el cálculo fueron $B = 300 \text{ m}$, $n = 0.030$ y $S = 0.00125$. Suponiendo una velocidad en el río de 2 m/s , se calculó el gasto líquido en la sección, el cual puede llegar a ser, en promedio, del orden de $1,500 \text{ m}^3/\text{s}$, que está en el rango de los valores procedentes de los datos hidrométricos de la citada estación. Para calcular el gasto de fondo se utilizó el método de Meyer-Peter y Müller (Maza et al., 1996), el cual arrojó un transporte de fondo de $G_b = 222.78 \text{ kg/s}$. A partir de este resultado se estimó, mediante la consideración de que la relación del gasto líquido en el cauce y el de laboratorio es igual a la relación de gastos sólidos en esas mismas condiciones, que el gasto de fondo a utilizar en el canal experimental sería, en promedio, de hasta $G_b = 40.00 \text{ g/s}$. Este resultado es sólo una aproximación del orden de magnitud de los gastos sólidos a usar en el experimento.

El canal, que no es un modelo a escala sino una instalación experimental, es rectangular y tiene 14.00 m de largo, longitud limitada por el espacio físico disponible en el laboratorio. El tubo de vórtice fue instalado a 11.00 m de la entrada del canal, a fin de dejar un tramo largo para el establecimiento del flujo uniforme. El gasto líquido que circula por el canal se midió con un vertedor rectangular sin contracciones, apoyándose en un medidor de flujo ultrasónico para su calibración.

Con el fin de proporcionar la cantidad de sedimento seleccionada, se diseñó, construyó e instaló un alimentador de arena ajustable. Este dispositivo, que consta de una tolva con capacidad de 250 kg , se montó en la parte superior de la sección de entrada del canal, justo en el sitio donde se realiza la alimentación de agua. El dispositivo alimentador de arena fue calibrado, a fin de que se tuviera control sobre la cantidad de arena suministrada en cada experimento.

Para realizar la medición de la cantidad de sedimento extraído por el desarenador de tubo de vórtice se diseñó un tanque de medición especial de 2.73 m de longitud, 0.60 m de base y 0.63 m de altura, el cual consistió en un recipiente rectangular de dos cámaras con aquietadores, separadas con mallas, para atrapar el sedimento. Este tanque de medición de sedimento está acoplado a un vertedor triangular para medir el gasto líquido que pasa por el desarenador de tubo de vórtice y que por lo tanto se extrae del canal principal. El arreglo general de la instalación experimental se muestra en la ilustración 6.

Ilustración 6. Esquema del arreglo general del canal experimental.



De acuerdo con el IMTA (2000), la curva granulométrica del material de fondo del río Papaloapan en la estación Chacaltianguis presenta como valores característicos: $D_{90} = 0.404$ mm, $D_m = 0.25$ mm y $D_{50} = 0.23$ mm. El sedimento utilizado en el experimento fue arena de origen volcánico, con diámetros que van de 0.074 a 1.679 mm, con la distribución de diámetros mostrada en la ilustración 7. Este material tiene como diámetros característicos: $D_{90} = 0.42$ mm, $D_m = 0.25$ mm y $D_{50} = 0.22$ mm, por lo cual se consideró adecuada para los ensayos.

El canal de llegada es de acero inoxidable y tiene 4.48 m de longitud, 1.00 m de base y 1.50 m de altura. En él se encuentra instalado un vertedor rectangular sin contracciones laterales, con el que se determina el gasto líquido que fluye en el canal. Asimismo, el canal tiene dos tranquilizadores de flujo y un deflector.

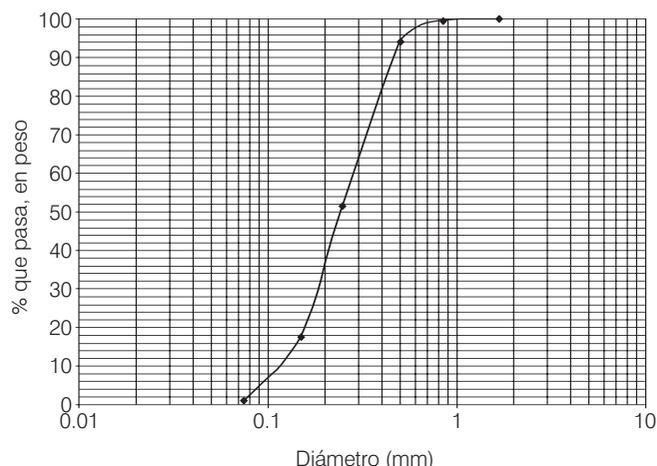
Alcance de la prueba

Los ensayos de laboratorio se llevaron a cabo utilizando, como dispositivo desarenador, tubería hidráulica de PVC en dos diferentes diámetros: 25 y 60 mm, así como tubería de acrílico de 100 mm de diámetro, usando ángulos de incidencia o esviajamiento de 45 y 90° en cada uno de los casos. La tubería de acrílico translúcido se utilizó con el fin de observar el vórtice formado en el interior. Las ranuras en el tubo desarenador fueron hechas según la recomendación de Atkinson (1994b), la cual indica que para valores entre 0.15 y 0.30 de la relación ancho de la ranura con respecto al diámetro del tubo (t/d), se presenta un funcionamiento adecuado. En el cuadro 1 se muestran los valores de las ranuras utilizadas en cada tubo.

El rango de gastos sólidos a ensayar está comprendido entre 15 y 173 g/s, aproximadamente. Lo anterior con la finalidad de observar el funcionamiento del desarenador fluidoico bajo diversas condiciones.

En total se llevaron a cabo 41 ensayos experimentales con tres variables: diámetro del desarenador, ángulo

Ilustración 7. Curva granulométrica de la arena de origen volcánico utilizada.



de esviajamiento y gasto sólido. En seis pruebas adicionales se varió el número de Froude, manteniendo fijas las dos primeras variables mencionadas.

Procedimiento experimental y alcance de la prueba

El procedimiento completo de cada prueba se describe a continuación:

1. Se hace funcionar la alimentación de agua al canal y se espera el tiempo suficiente para que pase el transitorio, de tal forma que se pueda considerar ya un flujo permanente. En la instalación de laboratorio, este tiempo no superó los veinte minutos.
2. Se prepara el dispositivo alimentador de sedimento (arena) con una cantidad conocida, en peso seco.
3. Se inicia la prueba poniendo en marcha el alimentador de arena. La prueba se desarrolla hasta que la cantidad conocida de sedimento es alimentada al canal. A fin de evitar que las condiciones de alimentación de arena cambien en forma drástica durante el experimento, se evita que la tolva se vacíe completamente.

Cuadro 1. Valores de la relación t/d utilizada en las pruebas.

Diámetro nominal (mm)	Diámetro interior (mm)	Ranura, t (mm)	Relación t/d
25*	29.8	7.5	0.252
60*	66.8	15.875	0.238
100**	100	25.4	0.254

* Tubería de PVC hidráulico.

** Tubería de acrílico.

Cuadro 2. Eficiencias de extracción. Gastos sólidos bajos.

Diámetro del tubo (mm)	Ángulo de incidencia (grados)	Longitud de la ranura, L (cm)	Abertura de la ranura, t (mm)	Gasto sólido, G_b (g/s)	Eficiencia de atrapamiento, E (%)	Eficiencia de extracción, W (%)
25	90	100	7.5	14.81	13.9	0.67
25	90	100	7.5	18.67	9.5	0.67
25	90	100	7.5	22.75	17.8	0.91
60	90	100	15.875	17.24	77.8	3.18
60	90	100	15.875	28.94	93.8	3.18
60	90	100	15.875	23.30	83.6	3.18
60	90	100	15.875	23.58	83.2	3.18
60	90	100	15.875	24.06	69.9	3.18
60	90	100	15.875	19.14	73.8	3.18
100	90	100	25.4	23.54	90.1	5.55
100	90	100	25.4	29.34	83.4	5.55
100	90	100	25.4	22.62	82.2	5.55
100	90	100	25.4	33.07	94.9	5.55
100	90	100	25.4	24.51	76.2	5.55
25	45	141.4	7.5	28.70	21.4	1.32
60	45	141.4	15.875	27.29	78.8	4.03
60	45	141.4	15.875	17.08	86.8	4.03
60	45	141.4	15.875	20.83	82.3	4.03
60	45	141.4	15.875	19.38	79.3	4.03
60	45	141.4	15.875	29.04	81.2	4.03
100	45	141.4	25.4	28.47	91.2	7.77
100	45	141.4	25.4	44.33	89.2	7.77
100	45	141.4	25.4	30.30	94.8	7.77

- Durante el ensayo, el desarenador fluídico de tubo de vórtice captura parte del sedimento. La parte restante se conduce junto con el gasto líquido hasta los canales de retorno del laboratorio.
- El tanque rectangular con aquietadores y mallas captura el sedimento extraído por el desarenador. El vertedor triangular instalado en el mismo tanque permite el aforo del gasto líquido extraído.
- El alimentador de arena se detiene una vez alimentado todo el sedimento; se concluye el experimento y se procede a la cuantificación del sedimento extraído por el tubo desarenador. Para esto se procede a extraer la arena depositada en el tanque de medición para secarla y pesarla. De esta manera se conoce la cantidad de arena extraída por el desarenador fluídico de tubo de vórtice.

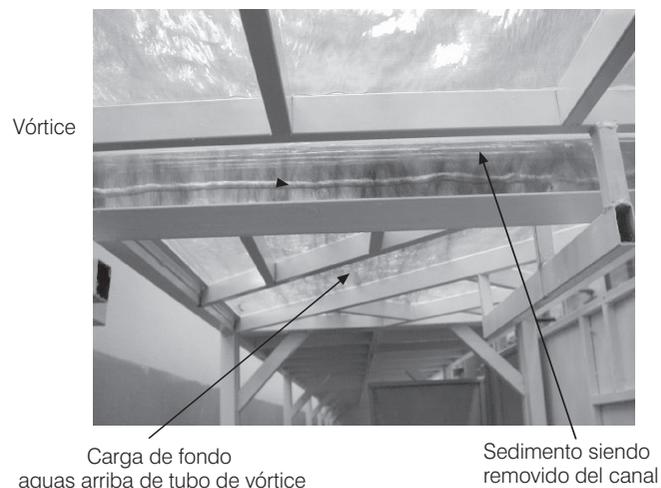
Resultados de los experimentos

En el tubo de 25 mm de diámetro no se forma el vórtice, provocando que el tubo se bloquee parcialmente, disminuyendo así la eficiencia de extracción de sedimentos a valores medios de 13%, con gastos sólidos bajos. Por esta razón no se realizaron pruebas adicionales con

gastos sólidos altos. Para los tubos de 60 y 100 mm, el vórtice se genera en forma adecuada, extrayendo el sedimento.

En el cuadro 2 se presentan los resultados obtenidos en las pruebas para el caso en que se utilizaron gastos

Ilustración 8. Vista inferior del canal y desarenador.



Cuadro 3. Eficiencias de extracción. Gastos sólidos altos.

Diámetro del tubo (mm)	Ángulo de incidencia (grados)	Longitud de la ranura, L (cm)	Abertura de la ranura, t (mm)	Gasto sólido, G_b (gf/s)	Eficiencia de atrapamiento, E (%)	Eficiencia de extracción, W (%)
60	90	100	15.875	68.97	60.9	3.18
60	90	100	15.875	83.06	63.2	3.18
60	90	100	15.875	59.45	66.9	3.18
100	90	100	25.4	70.52	72.2	5.55
100	90	100	25.4	68.59	81.4	5.55
100	90	100	25.4	78.79	74.8	5.55
100	90	100	25.4	84.03	68.5	5.55
100	90	100	25.4	83.33	72.8	5.55
60	45	141.4	15.875	77.40	67.6	4.03
60	45	141.4	15.875	86.81	67.8	4.03
60	45	141.4	15.875	85.62	63.8	4.03
60	45	141.4	15.875	73.96	72.0	4.03
60	45	141.4	15.875	58.96	64.0	4.03
100	45	141.4	25.4	61.43	81.8	7.77
100	45	141.4	25.4	61.58	74.2	7.77
100	45	141.4	25.4	66.23	78.0	7.77
100	45	141.4	25.4	69.44	78.2	7.77
100	45	141.4	25.4	69.06	79.8	7.77

sólidos bajos, mientras que en el cuadro 3 se consignan los resultados para el caso de gastos sólidos altos.

En la ilustración 8 se muestra el desarenador fluidoico de tubo de vórtice en pleno funcionamiento. Se observa la carga de fondo transportada en el canal aguas arriba del tubo de vórtice, la cual es atrapada por el tubo y extraída del canal por medio del vórtice que se forma en el interior del tubo. En la sección posterior al desarenador, la reducción en la carga de sedimentos transportada es clara.

Las ilustraciones 9 y 10 consignan los resultados de las pruebas para el caso de utilizar un desarenador de 60 y 100 mm de diámetro, respectivamente.

Del análisis de los resultados de los cuadros 2 y 3, y las ilustraciones 9 y 10, se desprenden los comentarios siguientes:

Para el tubo de 60 mm de diámetro nominal se lograron eficiencias de atrapamiento entre 60.9 y 93.8%, ambas para un ángulo de incidencia de 90°. Para un esviajamiento de 45°, la eficiencia de atrapamiento máxima fue de 86.8%. En todos los casos, la relación de extracción fue menor a 4.1%. En el caso del tubo de 100 mm se obtuvieron eficiencias de entre 72.2 y 94.9%, ambas para un ángulo de incidencia de 90°. Para un esviajamiento de 45°, la eficiencia de atrapamiento máxima fue

Ilustración 9. Eficiencia de atrapamiento en desarenador fluidoico. Diámetro = 60 mm.

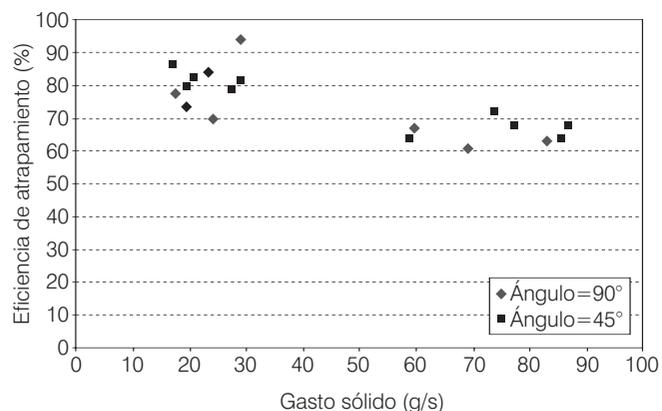
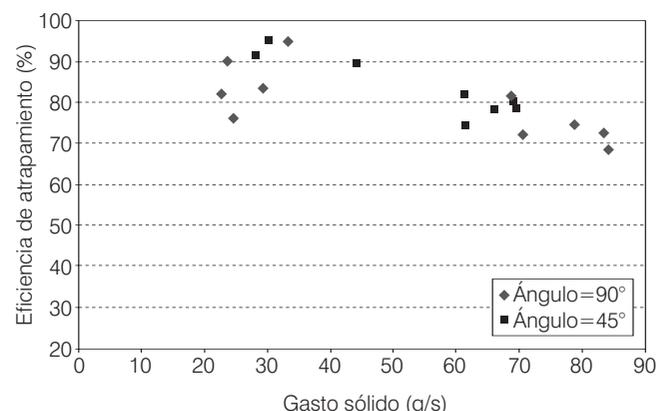


Ilustración 10. Eficiencia de atrapamiento en desarenador fluidoico. Diámetro = 100 mm.



Cuadro 4. Eficiencias de extracción. Gastos sólidos muy altos.

Diámetro del tubo (mm)	Ángulo de incidencia (grados)	Longitud de la ranura, L (cm)	Abertura de la ranura, t (mm)	Gasto sólido, G_b (gf/s)	Eficiencia de atrapamiento, E (%)	Eficiencia de extracción, W (%)	Núm. de Froude
100	90	100	25.4	114.81	80.60	5.55	0.80
100	90	100	25.4	93.02	79.00	5.55	0.80
100	90	100	25.4	136.61	75.50	5.55	0.80
100	90	100	25.4	173.61	90.30	10.08	0.60
100	90	100	25.4	146.63	88.40	10.08	0.60
100	90	100	25.4	137.36	90.50	10.08	0.60

de 94.8%. Las relaciones de extracción fueron menores de 8% en todos los casos.

La eficiencia de atrapamiento es mayor en el tubo de 100 mm que en el de 60 mm para un mismo gasto sólido, independientemente del ángulo de incidencia. Asimismo, para un mismo diámetro de tubo, dicha eficiencia es mayor para gastos sólidos bajos que para altos, independientemente del ángulo de incidencia. Por otro lado, se observa que para un mismo diámetro de tubo, la eficiencia de atrapamiento es mayor en el tubo colocado con un ángulo de incidencia o esviajamiento de 45°; sin embargo, si se observan las relaciones de extracción, se obtienen valores mayores que en el tubo perpendicular al eje del canal, lo cual representa que se estaría desviando más agua sin un incremento importante en la extracción de sedimentos. Con fines de ahorro de agua en el canal principal, el tubo a 90° es más recomendable.

Para el desarenador de 100 mm de diámetro se realizó una prueba adicional, con gastos del orden de 100 g/s y mayores, y dos diferentes números de Froude. De los resultados, mostrados en el cuadro 4, se observa que la eficiencia de extracción es mayor para un número de Froude de 0.60, que cuando se utiliza flujo con un número de Froude de 0.80. Sin embargo, al realizar las pruebas con $Fr = 0.60$, el sedimento se comienza a acumular en la entrada del canal, además de que se generan relaciones de extracción de casi el doble que para el caso de que se tenga el flujo con $Fr = 0.80$. Estas razones sugieren la selección de este último número de Froude. Para este caso, en el que se usó un ángulo de incidencia de 90°, se alcanzaron eficiencias de atrapamiento de 90.5%, con relaciones de extracción de 10.08%.

Los resultados obtenidos en este estudio son acordes con los encontrados por Fang *et al.* (1990), quienes argumentan que las condiciones óptimas de operación de estos dispositivos corresponden a eficiencias medias de atrapamiento del orden de 83% y relaciones de extracción de alrededor de 6%.

Conclusiones finales

Los resultados de los experimentos indican que, para los gastos manejados en el laboratorio, un desarenador fluídico de tubo de vórtice con diámetro de 25 mm es insuficiente, presentando eficiencias muy bajas y llegando en repetidas ocasiones a obstruirse con el sedimento. El diámetro de 60 mm, si bien de funcionamiento adecuado, no alcanza eficiencias mayores del 80%. El diámetro de 100 mm fue el que dio mejores resultados, alcanzando eficiencias de atrapamiento de hasta 94.9%, con eficiencias de extracción de apenas 5.55%. El uso de un ángulo de incidencia de 45° genera mejores eficiencias de extracción, logrando incrementos de hasta 16% con respecto al tubo colocado normal al eje del canal, aunque la relación de extracción aumenta en un 40%. Finalmente, cuando se tienen gastos sólidos altos, la eficiencia de atrapamiento disminuye, en promedio, un 20%. Por otro lado, la tasa de extracción no superó el 10% en todas las pruebas realizadas.

Con esto, la posibilidad de construir dispositivos de este tipo como una medida para el control de los sedimentos en canales de sistemas de riego y ríos de planicie se considera una alternativa viable.

Recibido: 12/07/2005

Aprobado: 11/07/2006

Referencias

- APARICIO, J., ESPINOSA, L., MAGAÑA, J. y SANTILLÁN, O. *Control de inundaciones en el río Papaloapan*. Congreso Nacional de Hidráulica, Puebla, México, D.F.: Asociación Mexicana de Hidráulica, 1994.
- ATKINSON, E. *Predicting the performance of sediment control devices at intakes*. Reporte OD/TN 41. Oxfordshire, Inglaterra: HR Wallingford, 1989.

- ATKINSON, E. *The vortex tube sediment extractor: A flow analysis and its design implications*. Reporte OD/TN 51. Oxfordshire, Inglaterra: HR Wallingford, 1990.
- ATKINSON, E. Vortex-tube sediment extractors. I: Trapping efficiency. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. Vol. 120, núm. 10, 1994a.
- ATKINSON, E. Vortex-tube sediment extractors. II: Design. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. Vol. 120, núm. 10, 1994b.
- Design manual for canal sediment extractors*. Vols. I, II y III. Oxfordshire, Inglaterra: HR Wallingford, 1993.
- FANG, D., FAN, C. y LIU, X. *Experimental study on the hydraulic characteristic and trapping efficiency of a vortex tube sediment trap*. Boston: ASCE, Boston Society of Civil Engineers, 1990.
- FISH, I.L. *Chatra canal – Nepal: Data collected during the 1985 irrigation season may -september*. Reporte OD/TN 16. Oxfordshire, Inglaterra: HR Wallingford, 1985.
- FISH, I.L., LAWRENCE, P. y ATKINSON, E. *Sedimentation in the Chatra Canal, Nepal*. Reporte OD85. Oxfordshire, Inglaterra: HR Wallingford, 1986.
- GARDE, R.J. y RANGA-RAJU, K.G. *Sediment control in canals. Mechanics of sediment transportation and alluvial streams problems*. New York: John Silwy & Sons, 1985.
- HR WALLINGFORD. *Folleto informativo 2*. Sin fecha de impresión. Oxfordshire, Inglaterra.
- HUFFERD, J., VANCE, R. y WATKINS, J. *Sediment control methods. Sedimentation engineering*. Vanoni V.A. (editor). New York: ASCE, 1977.
- IMTA. *Estudio granulométrico del río Papaloapan en el tramo Tuxtepec – Alvarado*. Informe técnico. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2000.
- MAZA, J. y GARCÍA, M. *Transporte de sedimentos*. Capítulo 10. *Manual de Ingeniería de Ríos*. Series del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Núm. 584. México, D.F.: UNAM, 1996.
- ODGAARD, A. y WANG, Y. *Sediment management with submerged vanes. I: Theory*. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. Vol. 117, núm. 3, 1991a.
- ODGAARD, A. y WANG, Y. *Sediment management with submerged vanes. II: Applications*. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. Vol. 117, núm. 3, 1991b.
- RUSSELL, C. *The optimum location for a canal sediment extractor*. Reporte OD/TN55. Oxfordshire, Inglaterra: HR Wallingford, 1991.
- SINGH, P. *Chatra Canal, Nepal. Vortex tube field measurements*. Reporte OD55. Oxfordshire, Inglaterra: HR Wallingford, 1983.
- UPPAL, H. *Sediment control in rivers and canals*. Publicación núm. 79, Nueva Delhi: Central Board of Irrigation and Power, 1966.

Abstract

RAMÍREZ, A.I. MEJÍA, R. & BLANCO-FIGUEROA, J.A. *Sediment removal extractors of the vortex type: an experimental study*. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XXII, no. 2, April-June, 2007, pp. 69-80.

A vortex tube sediment extractor is a device to extract sand and silt from rivers and irrigation channels. A vortex tube consists of a pipe, closed at one end, with a longitudinal slot along the top. The pipe is buried in the canal bed so that the slot is aligned with the surface of the bed. As water and sediment pass over the tube, a forced vortex is set up within it. Water and sediment are extracted from the canal and discharged off the channel. The performance of the device is evaluated through the trapping efficiency, which is defined as the relation between the extracted sediment and the total solid discharge that is transported by the river, and the extraction ratio, defined by the ratio between the flow that is extracted by the vortex tube and the total discharge of the river. The results of an experimental study carried out in the "Enzo Levi" laboratory at the Mexican Institute of Water Technology are presented in this paper. Results show that trapping efficiencies of around 94.4% can be achieved and that the extraction ratio is not greater than 10% in all the analyzed cases.

Keywords: vortex tube, sediment extractor, experimental study, irrigation channel, sediment control.

Dirección institucional de los autores:

Dr. Aldo Iván Ramírez-Orozco

Coordinación de Tecnología Hidrológica,
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso,
Jiutepec, Morelos, México, C.P. 62550,
teléfono: + (52) (777) 329 3600, extensión 181,
aramirez@tlaloc.imta.mx

M.I. Roberto Mejía-Zermeño

Subcoordinación de Hidrología y Mecánica de Ríos,
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso,
Jiutepec, Morelos, México, C.P. 62550,
teléfono: + (52) (777) 329 3600, extensión 886,
fax: + (52) (777) 329 3681,
rmejia@tlaloc.imta.mx

Ing. Juan Antonio Blanco-Figueroa

Departamento de Ingeniería y Proyectos,
Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Celaya,
Calle División del Norte 134,
Col. El Vergel, C.P. 38070
Celaya, Guanajuato, México,
teléfono: + (52) (461) 159 7100, extensión 7162,
fax: + (52) (461) 159 7100,
jblancof@jumapacelaya.gob.mx