

Análisis de la variabilidad espacial de los perfiles de velocidad en canales abiertos con elevada rugosidad

Analysis of the spatial variability of the speed profiles in open channels with roughness

Pietro Corapi¹ <https://orcid.org/0000-0001-8626-0134>,
Loiza Angeline Santos Santillan¹ <https://orcid.org/0000-0002-8671-8245>,
José Luis Campoverde Leiva¹ <https://orcid.org/0000-0002-6618-117X>

¹Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador
pietro.corapi@ug.edu.ec, langeliness12@gmail.com,
joseluisc.1996@outlook.com



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Enviado: 2023/01/13

Aceptado: 2023/03/27

Publicado: 2023/06/30

Resumen

En los canales abiertos la variabilidad espacial de la distribución de la velocidad se ve afectada por la distribución de la rugosidad del fondo y de las paredes laterales del cauce. La presente investigación propone analizar perfiles de velocidad en canales abiertos, evaluando datos registrados en el laboratorio “Grandi Modelli Idraulici” de la Universidad de Calabria (Italia). Se consideró la rugosidad de fondo que afecta el comportamiento del flujo de agua para comparar los perfiles de velocidad y esfuerzo cortante obtenidos en laboratorio con el esfuerzo cortante teórico. Se utilizó el lenguaje Matlab para procesar datos y elaborar gráficos. Se realizó la medición de 15 perfiles de velocidad, cada uno aproximadamente de 35 puntos. Las pruebas se realizaron en condición de flujo permanente uniforme, los datos de velocidad se procesaron en intervalos de 300s por punto, en cada sección la velocidad varía entre -0.5m/s y 1.0 m/s, los rangos de velocidad del proceso *despiking* varían entre -0.2 m/s a 0.7 m/s, siendo estos últimos los valores con los que se lleva a cabo el análisis. Se concluye que los esfuerzos viscosos están en rangos de -0.01 Pa a 0.02 Pa, esfuerzos cortantes turbulentos de -0.5 Pa a 3 Pa y esfuerzos cortantes de -0.5 Pa a 3 Pa. Estos últimos valores demuestran la preponderancia de los efectos turbulentos respecto a la viscosidad del fluido.

Palabras clave: Rugosidad, perfiles, *despiking*, viscosidad, turbulencia.

Sumario: Introducción, Materiales y Métodos, Resultados y Discusión y Conclusiones.

Como citar: Corapi, P., Santos, L. & Campoverde, J. L. (2023). Análisis de la variabilidad espacial de los perfiles de velocidad en canales abiertos con elevada rugosidad. *Revista Tecnológica - Espol*, 35(1), 105-119. <http://www.rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/1000>

Abstract

In open channels, the spatial variability of the velocity distribution is affected by the distribution of the roughness of the bottom and sidewalls of the channel. The present investigation aims to analyse velocity profiles in open channels by evaluating data recorded at the "Grandi Modelli Idraulici" laboratory of the University of Calabria (Italy). The bottom roughness that affects the water flow behaviour was considered to compare the velocity and shear profiles obtained in the laboratory with the theoretical shear stress; Matlab language was used to process data and elaborate graphs. Fifteen velocity profiles were measured, approximately 35 points each. The tests were carried out in a uniform permanent flow condition and the velocity data were processed in intervals of 300s per point; in each section, the velocity varies between -0.5m/s and 1.0 m/s, the velocity ranges of the despiking process vary between -0.2 m/s to 0.7 m/s, the latter being the values for the analysis. In conclusion, viscous stresses range from -0.01 Pa to 0.02 Pa, turbulent shear stresses from -0.5 Pa to 3 Pa, and shear stresses from -0.5 Pa to 3 Pa, the latter values showing the preponderance of turbulent effects concerning the viscosity of the fluid.

Keywords: Roughness, profiles, despiking, viscous, turbulent.

Introducción

La variabilidad de formas en que el flujo en canales abiertos se presenta puede ir desde una lámina de agua sobre el campo, debido a una fuerte precipitación, hasta un flujo de profundidad constante de un canal artificial. Este puede ser clasificado como permanente o no permanente, uniforme o no uniforme (García, 2016; Marín, 2017; Streeter et al., 2000).

En un canal abierto la presencia de la superficie libre y la fricción en sus paredes ocasiona que las velocidades no estén uniformemente distribuidas en su sección. Además, esta distribución de velocidades en el canal dependerá también de otros factores como: una forma inusual de la sección, la rugosidad del canal y la presencia de curvas (Chow, 2004).

Generalmente el comportamiento del flujo en canales abiertos se encuentra dado por los efectos de viscosidad y gravedad relacionadas con las fuerzas inerciales de flujo. Referente al efecto de la viscosidad y la inercia, el flujo puede ser laminar, turbulento o transicional y de acuerdo con el efecto de gravedad en el estado de flujo se ve representado por el número de Froude que es un número adimensional y está dado por la relación entre fuerzas inerciales y gravitacionales (Calderón, 2014; Casinita, 2014; Chow, 2004).

Una de las variables que puede incidir significativamente en el comportamiento del flujo es la rugosidad, lo que se traduce en una desigualdad en las distribuciones de velocidad (Corapi et al., 2022b). La influencia de la rugosidad sobre el flujo en paredes laterales y el fondo del canal hacen que la velocidad varíe de un punto a otro en toda la sección transversal (Corapi et al., 2022b).

Generalmente la máxima velocidad del flujo se encuentra cerca de la superficie libre. La presencia de rugosidad en un canal genera una curvatura en el diagrama de distribuciones vertical de velocidad, donde la velocidad es incrementada de forma considerable en el lado convexo de la curva debido a la acción centrífuga del flujo (Gavilan, 2001).

El estudio del comportamiento y variabilidad de la velocidad en un canal abierto, debido a la alta rugosidad, permite determinar las tensiones tangenciales que actúan en el fondo del lecho y el posible desencadenamiento de fenómenos de erosión, transporte del material sólido y depósitos (Corapi et al., 2022a). El flujo de un canal abierto es turbulento cuando las

fuerzas viscosas son débiles en comparación con las fuerzas de inercia (Carrasco, 2019; Castellanos, 2018; French, 1998).

La presente investigación tiene la finalidad de realizar un análisis de una data existente de velocidad en la dirección "x" y "z", para la velocidad a lo largo del canal, paralela al flujo en la dirección x se utilizará la variable "u" mientras que "Z" representa la profundidad de velocidad que será la variable "w" para comparar los perfiles de velocidad y esfuerzo cortante obtenidos en laboratorio con los perfiles de velocidad y de esfuerzo cortante teórico.

Al tener en cuenta la importancia de optimizar el diseño constructivo de canales abiertos, tomando en consideración la rugosidad de fondo que afecta al comportamiento del flujo de agua, se compararan los perfiles de velocidad y de esfuerzo cortante a fin de tomar en consideración pérdidas de energía que pueda tener el flujo. Es decir, realizar una comparación entre el comportamiento del flujo real y el comportamiento de flujo teórico. De esta manera, contrastar los resultados obtenidos en laboratorio con los resultados que según los métodos de cálculo establecidos en la bibliografía deberían obtenerse. El proceso se llevará a cabo mediante la aplicación del software de cálculo matricial Matlab para la elaboración numérica y gráfica de los datos.

Se buscó analizar la variabilidad espacial de los perfiles de velocidad en canales abiertos con elevada rugosidad y de esta manera realizar una correlación del comportamiento del flujo, teniendo en consideración una rugosidad del fondo del canal. El objetivo fue analizar los datos de medición de velocidades adquiridos mediante sistema Acoustic Doppler Velocimeter (ADV), determinar perfiles de velocidad y de esfuerzo cortante a lo largo de la ventana de medición, comparar perfiles de velocidad y de esfuerzo cortante obtenidos en laboratorios con los perfiles teóricos.

Aclaración

Se resalta que, este artículo es parte de un proyecto de investigación "Fondos Concursables Internos" de la Universidad de Guayaquil denominado "*Estudios de los perfiles de velocidad de flujo en canales abiertos*", con el cual los autores han participado, realizando el trabajo previo para la redacción del presente artículo.

Materiales y Métodos

El proceso experimental se llevó a cabo dentro de las instalaciones del laboratorio de "Grandes Modelos Hidráulicos" (GMI) del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Calabria, sobre un pequeño canal con un fondo de elevada rugosidad. El proceso de investigación incluyó la medición de 15 perfiles de velocidad, de los cuales cada perfil está compuesto aproximadamente por 35 puntos a lo largo de la vertical, la adquisición de datos referidos a un solo punto tomó 5 minutos (tiempo de adquisición) y todas las pruebas se realizaron en un flujo permanente uniforme (Q).

Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas a la Reynolds

La hipótesis fundamental fue que, la descomposición del componente de velocidad se da en dos descomposiciones, la media y la fluctuante, esta descomposición se llama descomposición de Reynolds.

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = g_x \frac{1}{\rho} * \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x} + \nu \nabla^2 \bar{u} - \left(\frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = g_y \frac{1}{\rho} * \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial y} + \nu \nabla^2 \bar{v} - \left(\frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} = g_z \frac{1}{\rho} * \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial z} + \nu \nabla^2 \bar{w} - \left(\frac{\partial \overline{w'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{w'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'w'}}{\partial z} \right) \quad (3)$$

Donde $\overline{u'u'}$, $\overline{u'v'}$, $\overline{u'w'}$ son las fuerzas de Reynolds o la fuerza turbulenta a partir de esta ecuación se obtiene la ecuación de Navier – Stokes promediada a la Reynolds.

Descripción del Canal

El canal en estudio tiene una longitud de 16,00 m, con una inclinación igual a 0,25%. Aguas arriba del canal existe una bomba sumergible que reintroduce el agua que se expulsa del mismo al canal, se recoge en un tanque aguas abajo del canal y se descarga en el canal de suministro el cual fluye hacia el tanque dentro del cual se sumerge la bomba para crear un circuito cerrado. Al final del canal hay un vertedero regulable para el control del tirante. Figura 1.

Figura 1

Canal Experimental



Medición de Canales Abiertos mediante tecnología ADV (2022) (Corapi et al., 2022a)

Una estructura de ladrillos perforados se coloca aguas abajo de la bomba y aguas arriba del canal. Por donde pasa el flujo a lo largo de la dirección principal del canal como se observa en la Figura 2.

Figura 2

Estructura de ladrillos perforados

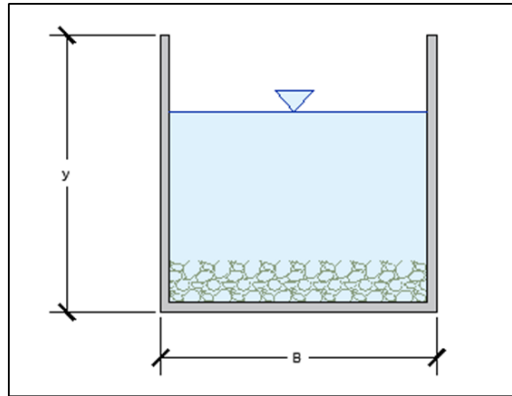


Medición de Canales Abiertos mediante tecnología ADV (2022) (Corapi et al., 2022a)

La sección del canal es de forma rectangular con ancho $B = 1.00 \text{ m}$, la altura $H = 0.70 \text{ m}$. La rugosidad k_s fue extrapolada de los sedimentos a 79.94 mm y la desviación estándar geométrica de los agregados (σ_g) igual a 17.63 mm , Figura 3, mediante un análisis con láser scanner de los sedimentos presentes en el cauce.

Figura 3

Geometría del canal



Evaluación experimental del coeficiente de Coriolis en canales abiertos con elevada rugosidad (2022) (Corapi et al., 2022b)

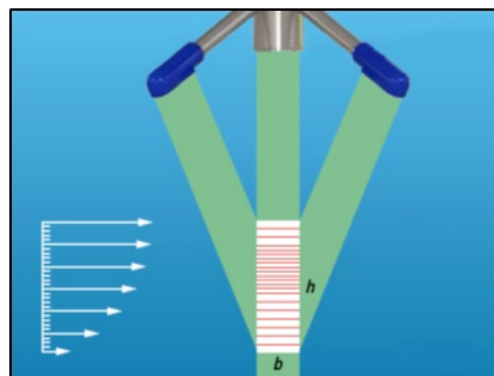
Aguas abajo del tanque de recolección a lo largo del canal de alimentación se encuentra un vertedero Bazin de paredes delgadas. El caudal Q medido es igual a 52.1 l/s , el cual genera una condición de flujo permanente en el canal.

Descripción del Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)

Se utiliza para medir el campo de velocidad a altas frecuencias, en las tres direcciones x ; y ; z . Un (ADV) mide los componentes de la velocidad en el espacio usando el efecto Doppler, el efecto Doppler es el cambio en la frecuencia de una onda como consecuencia del movimiento relativo entre emisor y receptor, permite saber si un objeto se aleja o se acerca a un observador y a qué velocidad lo hace. El instrumento utilizado consta de un emisor acústico, cuatro receptores acústicos y un módulo de procesamiento de señales. El emisor acústico genera una señal acústica que se escucha por la dispersión del sonido de las partículas presentes en el agua, y se mueven a la misma velocidad de la corriente del flujo de agua. La señal acústica reflejada es detectada por los receptores acústicos y utilizada para calcular el desplazamiento de fase Doppler del que se deriva el campo de velocidad.

Figura 4

Volumen de control ADV



Medición de Canales Abiertos mediante tecnología ADV (2022) (Corapi et al., 2022a)

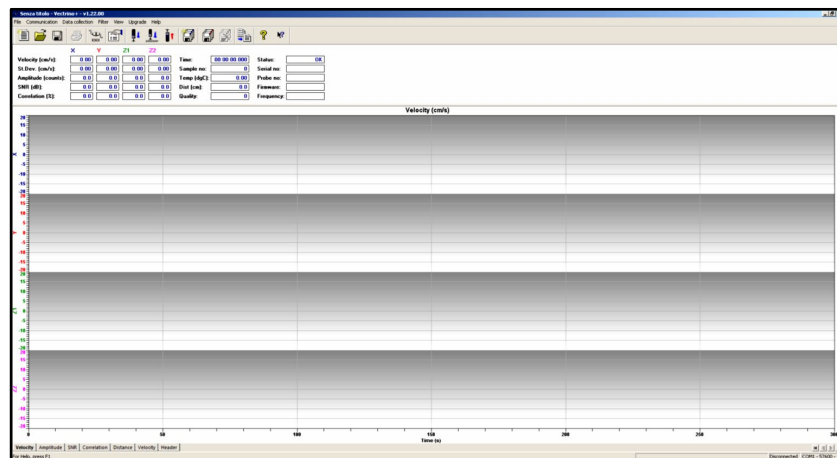
La Figura 4 muestra las dimensiones del volumen de control h y b que representan la altura y el ancho respectivamente. Este volumen de control se caracteriza por contener partículas en suspensión presentes en el flujo, que generan la Relación Señal-Ruido (SNR), indicando la bondad de la señal debido a un número suficiente de partículas en suspensión capaces de reflejar la señal.

Software de Adquisición de Datos: Vectrino Plus

El instrumento está equipado con un software para la gestión de adquisiciones y configuraciones llamado Vectrino Plus. La pantalla principal se muestra en la Figura 5.

Figura 5

Pantalla principal del software Vectrino Plus



Medición de Canales Abiertos mediante tecnología ADV (2022) (Nortek, 2018)

En este diseño, se muestran las velocidades a lo largo de las direcciones x , y , z_1 , z_2 donde la presencia de z_1 y z_2 es útil no solo para medir la velocidad sino también para determinar los valores de la correlación (c) de los datos que describen la bondad de la señal.

Los archivos generados de la adquisición a través del software Vectrino Plus y convertidos a formato ASCII (.dat) se representan mediante una matriz de 30000×19 .

Los datos contenidos en estos archivos se describen a continuación. Cada uno de los 30000 puntos se refiere a un instante de tiempo a partir de $t = 0$ con un aumento por Δt para $a \frac{1}{f} = 0,01$ ya que la frecuencia de adquisición f es igual a 100 Hz .

- Columna 1: Tiempos progresivos de 0 s a 300 s;
- Columnas 4, 5, 6, 7: Velocidades de puntos a lo largo de x , y , z_1 , z_2 en $\frac{m}{s}$;
- Columnas 8, 9, 10, 11: Intensidad de la señal instantánea a lo largo de x , y , z_1 , z_2 ;
- Columnas 12, 13, 14, 15 - Ruido instantáneo (SNR) a lo largo de x , y , z_1 , z_2 en dB;
- Columnas 16, 17, 18, 19: Correlación instantánea a lo largo de x , y , z_1 , z_2 en %.

Esfuerzos cortantes

Los esfuerzos cortantes Figura 6, se dan por la suma de los componentes del esfuerzo tangencial o viscoso y por los componentes de la tensión turbulenta, considerando los esfuerzos que actúan sobre el plano x , z , se tiene:

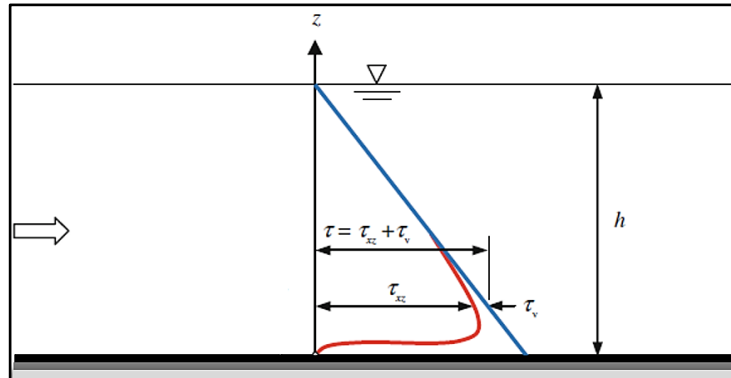
Ecuación 1. (Ecuación de esfuerzos cortantes)

$$\tau = \tau_{lam} + \tau_{turb} = \mu \frac{d\bar{u}}{dz} - \rho \overline{u'w'} \quad (1)$$

Donde τ_{lam} componente de la tensión viscosa, τ_{turb} es el componente de la tensión turbulenta.

Figura 6

Distribución del esfuerzo cortante uniforme en un canal abierto Experimental



Verificación del rendimiento de ADV en fluidos de alta concentración de sedimentos finos. (Dey, 2014)

Adimensionalización de los Esfuerzos Cortantes

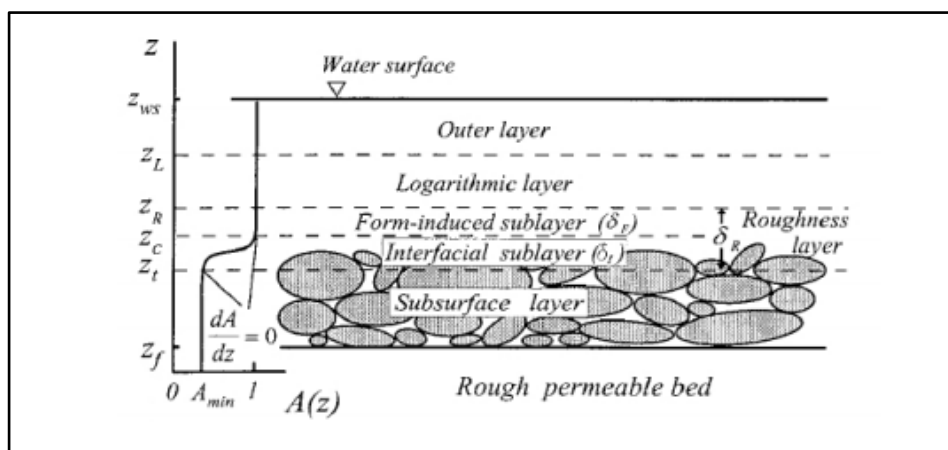
Para la adimensionalización de los esfuerzos cortantes, se deberá dividir los esfuerzos cortantes para el esfuerzo de corte máximo total (τ_0), que normalmente se encuentra cerca del fondo del canal. En tanto, para la adimensionalización de los valores de profundidad (Z) se dividen para la altura del agua medida desde el fondo (Z_{ws}) (Corapi et al., 2021).

Perfiles de velocidad

La determinación del perfil de velocidad requiere la división del campo de movimiento en diferentes zonas. Los campos de corriente en un terreno accidentado permeable se pueden dividir en tres capas principales Figura 7: capa exterior, región de fondo y capa subsuperficial. La región del fondo incluye la capa logarítmica y la capa de rugosidad. La capa de rugosidad contiene la subcapa inducida por la forma del lecho, ubicada justo encima de las crestas del lecho, y la subcapa interfacial entre las crestas y los cables.

Figura 7

Divisiones del perfil de velocidad



Datos del Despiking en el Acoustic Doppler Velocimeter (2022) (Goring & Nikora, 2002)

Adimensionalización de los Perfiles de Velocidad

Para la adimensionalización de los perfiles de velocidad se emplea la velocidad de corte, donde:

Ecuación 2. (Velocidad de fricción)

$$u^* = \left(\frac{\tau_0}{\rho}\right)^{1/2} \quad (2)$$

Donde: u^* = Velocidad de fricción (m/s), τ_0 = esfuerzo cortante máximo en el perfil de los esfuerzos cortantes totales (Pa), ρ = densidad del agua $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$.

Y la adimensionalización se obtiene como (u/u^*)

En tanto, para la adimensionalización en el eje y, los valores de Z se dividen para la altura del agua medida desde el fondo del canal Z_{ws} .

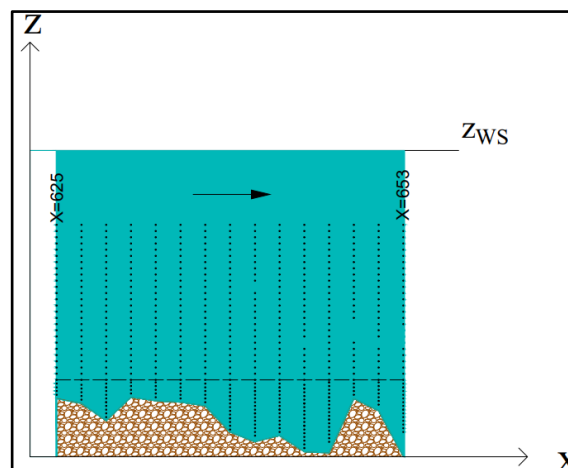
Resultados y Discusión

Para realizar el procesamiento de datos numéricos y debido a la extensa cantidad de datos con la que se disponía se utilizó el software Matlab.

Como ya se explicó en el apartado anterior, la medición en el canal se conformó por 15 perfiles de velocidad en la dirección predominante del flujo Figura 8, los cuales fueron identificados como (desde aguas arriba hacia aguas abajo): X=625, X=627, X=629, X=631, X=633, X=635, X=637, X=639, X=641, X=643, X=645, X=647, X=649, X=651, X=653, y cada uno de estos perfiles está compuesto por aproximadamente 35 puntos a lo largo de la vertical.

Figura 8

Cuadrícula de Medición



Evaluación experimental del coeficiente de Coriolis en canales abiertos con elevada rugosidad (2022) (Corapi et al., 2022b)

Análisis Señal

La señal adquirida que es procesada en el software Matlab, puede verse afectada por picos aislados instantáneos que podría modificar los valores de la media y la desviación estándar.

Un pico consiste en una variación instantánea del valor de la señal (velocidad), más específicamente representa un valor de velocidad pico de corta duración, que posiblemente es debido a una correlación instantánea; esta baja correlación normalmente es relacionada con LA baja cantidad de partículas sólidas suspendidas en el volumen de control (Velasco et al., 2009). Por esta razón, es necesario aplicar un procedimiento de limpieza de señales, denominado despiking.

Este procedimiento se divide en dos fases:

- Buscar picos;
- Reemplazo de picos

El método de despiking que se utilizó se seleccionó entre los métodos propuestos por (Goring & Nikora, 2002) y a continuación se describe:

Para comenzar se realizó una verificación inicial de la correlación de los datos y de la desviación estándar σ

$$\text{corr } u < 70 \quad u' > 4\sigma_u \quad (3)$$

En la ecuación (3), se indican los límites que normalmente son aceptados en la literatura, en las mediciones de ADV con presencia de macrorugosidad, se considera aceptable el 70%, mientras que la desviación de 4σ elimina los puntos que salen del fractil en un 99,994%, bajo el supuesto de que la señal se distribuye de acuerdo con la ley normal del caso. En tanto, que el segundo control se basa en el análisis de los componentes de aceleración (σ_u) y se tiene dos fases. El primero para aceleraciones negativas y el segundo para aceleraciones positivas (Corapi et al., 2022a).

$$a_u < k g \quad (4)$$

O

$$a_u > k g \quad (5)$$

Donde, se tiene que $k=1.50$,

g = aceleración gravitacional igual a $9.806 \frac{m}{s^2}$

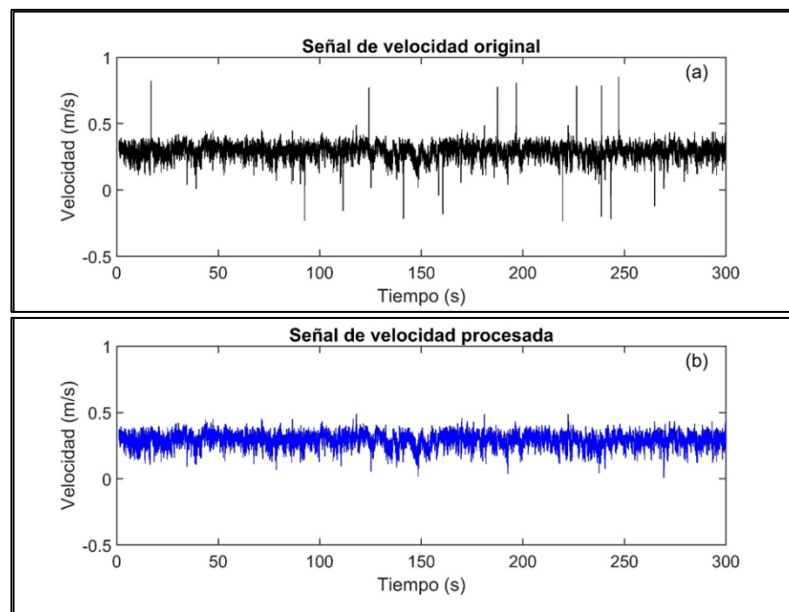
$a_i = \frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta t}$, que es la aceleración de las partículas en el i-énésimo punto.

Si los datos sobre los que se realizó el análisis no se encuentran dentro de los rangos dictados por las condiciones, se sustituye el valor de velocidad instantánea por el valor medio referido a toda la señal u_{med} .

A lo largo de la dirección z , se aplican las mismas condiciones para realizar la eliminación de señales.

Figura 9

Señal de velocidad. (a) original, (b) procesada



En la Figura 9 (a) se observa la señal sin procesar (original), mientras en la Figura 9 (b) se observa la aplicación del proceso *despiking* de datos para conseguir la eliminación de picos.

Perfiles de Velocidad

Para obtener los perfiles de velocidad en el espacio se comienza aplicando el procedimiento de despiking a los datos de velocidad obtenidos en los diferentes puntos verticales de cada uno de los perfiles horizontales, luego se procede a realizar un promedio temporal de estos datos ya depurados en cada uno de los perfiles.

Finalmente, se realiza la adimensionalización de los perfiles de velocidad.

Los datos de los esfuerzos de corte τ_0 , y del cálculo de la velocidad de fricción u^* , de los 15 perfiles se muestran a continuación:

Tabla 1

Velocidad de fricción y esfuerzo de corte de los Perfiles de velocidad

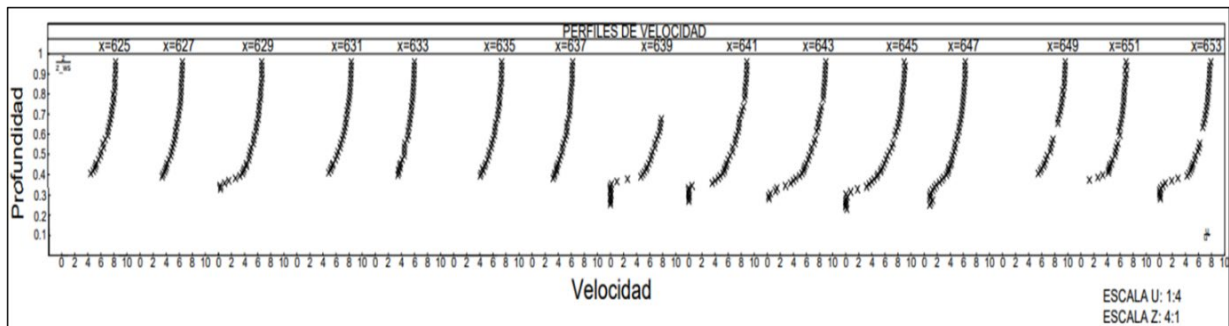
PERFIL	τ_0 (Pa)	u^* (m/s)
X=625	1.533	0.039
X=627	2.482	0.049
X=629	2.322	0.048
X=631	1.49	0.039
X=633	2.921	0.054
X=635	1.932	0.044
X=637	2.769	0.053
X=639	1.366	0.037
X=641	1.376	0.037
X=643	1.333	0.037
X=645	1.313	0.036

PERFIL	τ_0 (Pa)	u^* (m/s)
X=647	2.71	0.052
X=649	1.182	0.034
X=651	2.291	0.048
X=653	1.868	0.043

Presentamos en la siguiente figura los perfiles de velocidad de todas las secciones

Figura 10

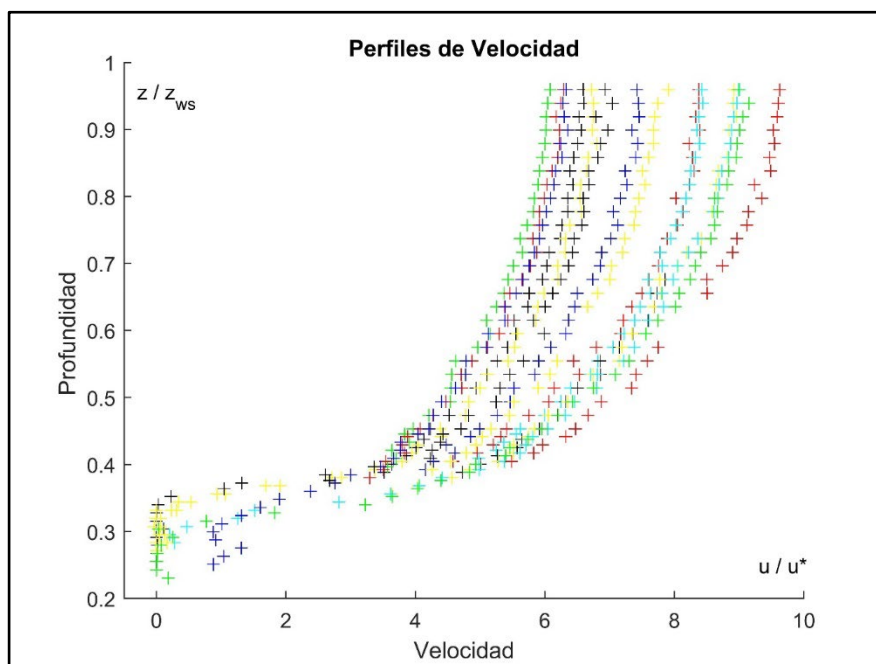
Perfiles de velocidad adimensionalizado (u/u^) de todas las secciones*



En la Figura 11 se observan los 15 perfiles de velocidad superpuestos desde los cuales se puede confirmar que, aunque exista una cierta variabilidad en la velocidad, debido a la rugosidad no uniforme del fondo del canal, la forma es semejante para todos los perfiles cumpliendo con cuanto evidenciado en (Nikora et al., 2001).

Figura 11

Comparación gráfica de los perfiles de Velocidad adimensionales



Cálculo de los esfuerzos cortantes viscosos.

Las componentes de los esfuerzos cortantes viscosos (τ_{lam}) a lo largo de la vertical se describen a continuación:

$$\tau_{lam} = \rho v \frac{d\bar{u}}{dz} \quad (6)$$

Donde \bar{u} , representa el componente de velocidad, a lo largo de la dirección principal, se tiene que $\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$ y $v = 1.126 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$ para $T = 15^\circ C$.

Finalmente, se procede a realizar adimensionalización de los esfuerzos cortantes viscosos donde se divide el $\frac{\tau_{lam}}{\tau_0}$, y los valores de profundidad Z se dividen para la altura total del canal medida desde el fondo Z_{ws} .

Cálculo de los esfuerzos cortantes turbulentos.

El cálculo de los esfuerzos cortantes turbulentos está dado por la ecuación 7, donde se muestra la componente de los esfuerzos cortantes turbulentos.

$$\tau_{turb} = -\rho(\overline{u'w'}) \quad (7)$$

Las componentes $(\overline{u'w'})$, en primera instancia se obtuvieron promediando sus fluctuaciones individualmente y después se realiza la multiplicación de estos valores, referidos a una elevación z dada para un perfil determinado, finalmente se promediaron los valores obtenidos. Una vez obtenidos los valores de $(\overline{u'w'})$ a lo largo de la vertical z, se realiza la multiplicación por $\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$. Para proceder a la adimensionalización de los esfuerzos cortantes turbulentos se divide el $\frac{\tau_{turb}}{\tau_0}$, y los valores de profundidad Z se dividen para la altura total del canal medida desde el fondo Z_{ws} .

Cálculo de los Esfuerzos Cortantes Totales.

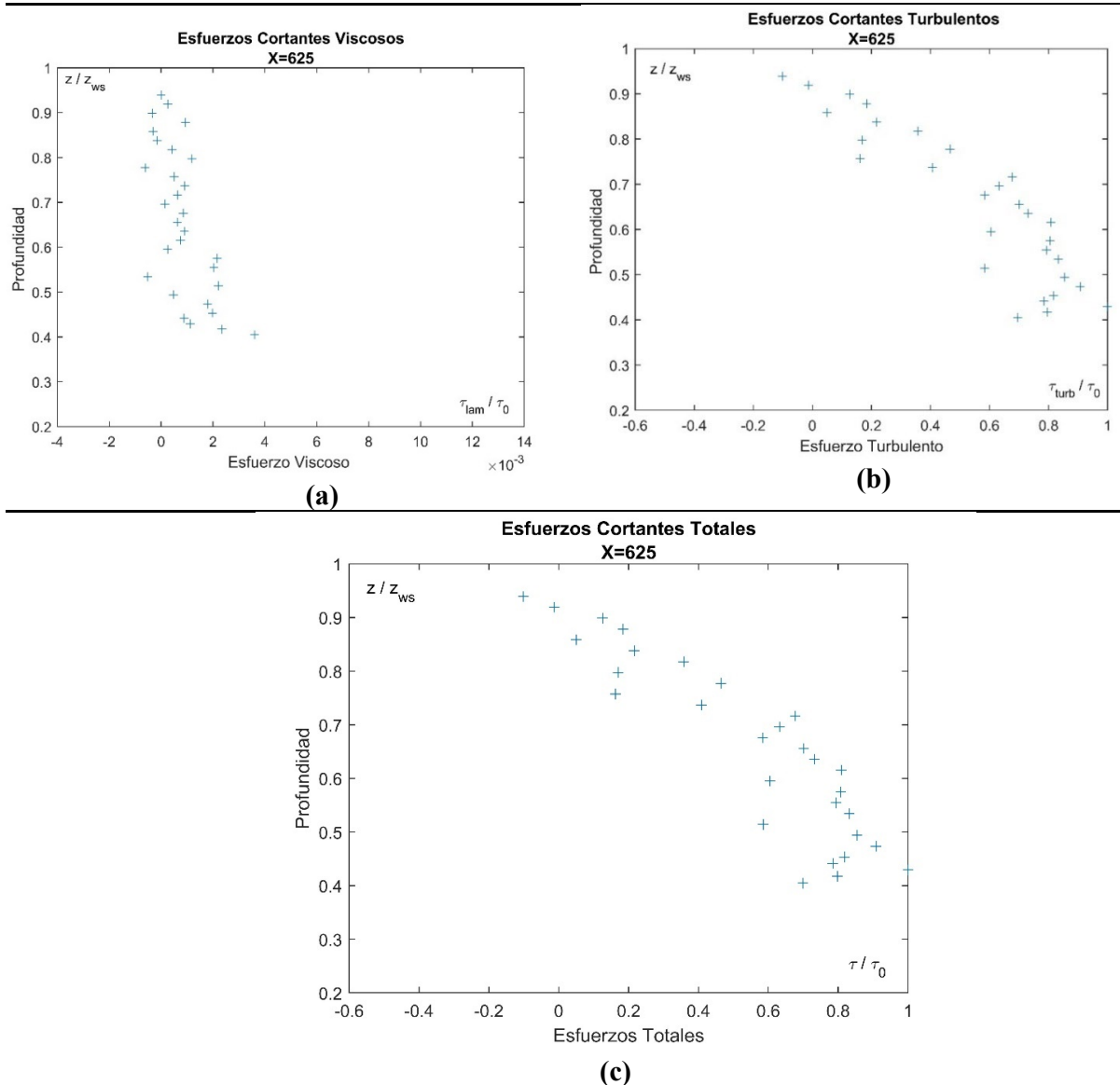
Al sumar los esfuerzos viscosos y turbulentos y graficar el resultado se obtienen los esfuerzos cortantes totales (τ).

Para proceder a la adimensionalización de los esfuerzos cortantes totales se divide el $\frac{\tau}{\tau_0}$; los valores de profundidad Z a su vez son divididos para la altura total del canal medida desde el fondo (Z_{ws}).

Se obtienen graficas de esfuerzos cortantes para las 15 secciones, a continuación, en la Figura 12 (a,b,c) se muestra la distribución de esfuerzos cortantes (a) Viscosos (b) Turbulentos (c) Totales, para la sección X=625.

Figura 12

Sección $X=625$. (a) Esfuerzos cortantes viscosos, (b) esfuerzos cortantes turbulentos, (c) esfuerzos cortantes totales



Conclusiones

De los datos originales de velocidad procesados con el software Matlab, para un intervalo de medición de 300 s por punto en cada sección, se obtuvo que la velocidad varía entre -0.5 m/s y 1.0 m/s. En cuanto a los datos de señal depurada con el procedimiento de despiking, así mismo en un tiempo de 300 s, se obtiene una reducción en los rangos de la señal de velocidad, la cual varía de entre -0,2 m/s a 0,7 m/s. Las velocidades negativas, comprueban la presencia de vórtices que en determinados puntos tienen dirección opuesta a la del flujo.

Se determinaron 15 perfiles de velocidad, promediados en el tiempo. Se obtuvo así, valores de velocidad que varían entre 0 y 0.35 m/s. Además, la forma de los perfiles es semejante, cuya única diferencia se da por la variación de velocidad. En cuanto a los esfuerzos cortantes, se tiene que los esfuerzos viscosos están en rangos de -0.01 Pa a 0.02 Pa, mientras que, los esfuerzos cortantes turbulentos se encuentran en rangos de -0.5 Pa a 3 Pa y los esfuerzos cortantes totales se encuentran en rangos de -0.5 Pa a 3 Pa. Entonces los esfuerzos

turbulentos son de mayor magnitud respecto a los esfuerzos viscosos, por esta razón los esfuerzos cortantes totales tienen rangos y distribución similares respecto a los esfuerzos turbulentos, verificando, por ende, la teoría de los perfiles de esfuerzos cortantes.

En los esfuerzos cortantes totales se tiene un incremento de intensidad cerca del fondo, debido a la mayor fricción a la cual está sujeto el flujo por la elevada rugosidad del fondo, el valor máximo de esfuerzo cortante (τ_0) se ha empleado para adimensionalizar los perfiles con el fin de poder compararlos, de todas las secciones el de mayor intensidad se encuentra en la sección $X=633$, siendo el esfuerzo de 2.921 Pa.

Referencias

- Calderón, J. A. (2014). *Comportamiento Hidráulico de sistemas de tuberías bajo fluido supercrítico: Diseño tradicional vs Diseño futuro*. Universidad de los Andes.
<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/17158/u703594.pdf?sequence=1>
- Carrasco, X. (2019). *Estudio y caracterización hidráulica del óvalo 21 al óvalo 22 del canal de riego Ambato-Huachi- Pelileo, cantón Cevallos, Provincia de Tungurahua*. Universidad Técnica de Ambato.
<https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/29539/1/Tesis%20I.%20C.%201305%20-%20Carrasco%20Carrasco%20Xavier%20Alejandro.pdf>
- Casignia, M. (2014). *Dimensionamiento Hidráulico de una estructura de unión de dos canales*. Universidad Central del Ecuador. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/3015/1/T-UC-0011-135.pdf>
- Castellanos, M. (2018). *Estudio experimental de flujo en canales abiertos*. Universidad de Jaen.
https://tauja.ujaen.es/jspui/bitstream/10953.1/9194/1/Memoria_TFG_Isabel.pdf
- Chow, V. T. (2004). *Hidraulica de Canales Abiertos*. McGraw-HILL.
- Corapi, P., Acaro, X. C., Mendoza, J. C., & Vera, P. E. (2022b). *Experimental Evaluation of the Coriolis Coefficient in Open Channels with High Roughness*. LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology. <https://laccei.org/LACCEI2022-BocaRaton/meta/FP123.html>
- Corapi, P., Acaro, X., & Arroyo, J. (2022a). *(Acoustic Doppler Velocimeter) tecnología ADV (Issue February)*. Grupo Compas.
https://www.researchgate.net/publication/358862496_Medicion_de_velocidades_en_canales_abiertos_mediante_tecnologia_ADV_Acoustic_Doppler_Velocimeter
- Corapi, P., Acaro, X., & Chuquimarca, L. (2021). *Velocity scaling in open-channel flows with sediment transport*. Tecnología y Ciencias del Agua. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-05-02>
- Dey, S. (2014). *Fluvial hydrodynamics: Hydrodynamic and sediment transport phenomena*. Journal of Hydraulic Research. <https://doi.org/10.1080/00221686.2014.968888>
- French, R. (1998). *Hidraulica de Canales Abiertos*. McGRAW-HILL.
- García, N. (2016). *Hidráulica de Canales Principios básicos*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/riego-drenaje/Hidraulica-de-canales.pdf
- Gavilan, G. (2001). *Guia de Laboratorio de Hidraulica de Canales Abiertos*.
- Goring, D. G., & Nikora, V. I. (2002). *Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data*. Journal of Hydraulic Engineering.
https://www.researchgate.net/publication/245296487_Despiking_Acoustic_Doppler_Velocimeter_Data
- Marín, E. (2017). *Construcción de un modelo hidráulico para la simulación de tipos de flujo en canales abiertos para el laboratorio de mecánica de fluidos e hidráulica de la facultad de ingeniería, usac*. Universidad de San Carlos de Guatemala. <https://core.ac.uk/download/pdf/94669661.pdf>

- Nikora, V., Goring, D., McEwan, I., & Griffiths, G. (2001). *Spatially Averaged Open-Channel Flow over Rough Bed*. Journal of Hydraulic Engineering.
https://www.researchgate.net/publication/270851629_Spatially_Averaged_Open-Channel_Flow_over_Rough_Bed
- Nortek. (2018). *Comprehensive Manual for Velocimeter*.
- Streeter, V. L., Wylie, E. B., & Bedford, K. W. (2000). *Mecánica de Fluidos* (Vol. Novena Edición).
- Velasco, D., & Craig, H. (2009). *Experimental verification of acoustic Doppler velocimeter (ADV) performance in fine-grained, high sediment concentration fluids*. SonTec/YSI.
<https://www.xylemanalytics.co.uk/media/pdfs/sontek-adv-in-fluid-mud.pdf>