

Artículo Científico / Scientific Article

Modelo para el cálculo del coeficiente de rugosidad de Manning en función de la altura del material del fondo del cauce del río Achiguate-Guacalate

Model for the calculation of the Manning roughness coefficient as a function of the height of the bottom material of the Achiguate-Guacalate river

Jorge Eduardo Fernández Cardona

¹Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos,
Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala
Dirección para recibir correspondencia: jorgedufer@yahoo.com

Recibido: 11/04/2019 Aceptado: 26/11/2019

Resumen

Este artículo presenta una propuesta para estimar el coeficiente de rugosidad de Manning a través de un modelo matemático para la cuenca del río Achiguate-Guacalate. Para el logro de este fin se tomó como base las ecuaciones de Chezy y de Manning con el objetivo de obtener una expresión para el coeficiente de rugosidad en función del radio hidráulico "Rh" y la altura de rugosidad "K" de las partículas del fondo del cauce del río. El Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología y Meteorología -INSIVUMEH- a través de su departamento de Hidrología opera a partir del año 2002 las estaciones de aforo cuyos datos fueron recopilados y procesados para la formulación del modelo matemático. Este modelo se validó con muestras tomadas de la cuenca en tres puntos diferentes dentro de la misma obteniendo de cada una de ellas el diámetro medio D_{50} a través de un análisis granulométrico realizado a cada una de ellas. Con estos datos se obtiene un valor para "n" en los puntos seleccionados aplicando el modelo. Para comparar resultados, se analiza con la misma información con la que se propone el modelo, una estimación de "n" por medio de otros métodos, los visuales y los analíticos. Finalmente se compara el modelo con aforos recientes cuyos datos son nuevos y no fueron utilizados en la creación del modelo. Como resultado se propone el modelo $n=0.091 K^{(1/6)}$, donde "K" que representa la rugosidad del fondo del cauce estimada en 0.027 para el muestreo realizado en Alotenango. Al aplicar el modelo para Alotenango, la ecuación sería $n=0.091 * 0.27^{(1/6)}$, obteniéndose un valor para "n" de 0.073 que al compararse con los métodos visuales resulta alto, pero similar al calculado por métodos analíticos.

Palabras claves: cuenca, radio hidráulico, altura de rugosidad, coeficiente de rugosidad, diámetro medio.

Abstract

This article presents a proposal to estimate the Manning coefficient roughness through a mathematical model for the Achiguate-Guacalate River basin. For this achievement, the Chezy and Manning equations were based on the aim of obtaining an expression for the coefficient of roughness as a function of the hydraulic radius "Rh" and the roughness height "K" of the particles from the bottom of the riverbed. The National Institute of Seismology, Volcanology, and Meteorology -INSIVUMEH- through its Department of Hydrology operated since 2002 the gauging stations whose data was collected and processed for the formulation of the mathematical model. This model was validated with samples taken from the basin at three different points within it, obtaining from each of them the average diameter D_{50} through a granulometric analysis carried out by each of them. With this data, a value for "n" is obtained in the selected points by applying the model. To compare results, it is analyzed with the same information with which the model is proposed, an estimation of "n" by other methods, visual and analytical. Finally, the model is compared with recent river gauging whose data are new and were not used in the creation of the model. As a result, the model $n = 0.091 K^{1/6}$ is proposed, where "K" representing the roughness of the bottom of the channel was estimated at 0.027 for sampling in Alotenango. When applying the model for Alotenango, the equation would be $n = 0.091 * 0.27^{1/6}$, obtaining a value for "n" of 0.073 that when compared to visual methods it is high, but is like that calculated by analytical methods.

Key words: basin, hydraulic radius, roughness height, roughness coefficient, medium diameter.



Introducción

El Ing. Robert Manning del Instituto de Ingeniería Civil de Irlanda en el año de 1889 presentó una ecuación de la velocidad en los cauces en función de la velocidad media, del factor de resistencia al flujo, del radio hidráulico y de la pendiente representada en la ecuación 1 siguiente:

$$V = C * Rh^{2/3} * S^{1/2} \quad (1)$$

La variable “V” de la ecuación 1, es la velocidad media, “C” el factor de resistencia al flujo, “Rh” el radio hidráulico y “S” la pendiente.

La ecuación 1 fue modificada posteriormente por otros investigadores, transformándola en la ecuación 2 para unidades métricas.

$$V = \frac{1}{n} * Rh^{2/3} * S^{1/2} \quad (2)$$

El coeficiente de rugosidad de Manning está representado por “n” en la ecuación 2

Existen varios métodos para estimar el valor del coeficiente de rugosidad de Manning como el del Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (N.R.C.S.) de los Estados Unidos que se basa en un valor al cual se le aplican modificaciones acordes a las características del cauce analizado.

Algunas experiencias profesionales proporcionan tablas para el valor del coeficiente de Manning. Algunas de estas tablas determinan este valor por medio de fotografías que muestran las características del cauce que al compararlas con el canal observado se puede a base de experiencia estimar el valor del coeficiente.

Antecedentes

Otro procedimiento para poder obtener el valor para el coeficiente de rugosidad de Manning de determinado cauce se realiza a través de una expresión teórica mediante un procedimiento iterativo de una ecuación cuyos términos incluyen las pendientes del fondo del canal y de la línea de energía, así como el número de Froude, el coeficiente de Manning y las profundidades del tramo del canal en estudio.

En 1990 Karim desarrolló una expresión para un sector de canal para poder calcular un valor para el coeficiente de Manning relacionando las velocidades con la descarga de sedimentos. En esta expresión se toma en cuenta factores como la fricción del flujo en una lámina de lecho inmóvil, la fricción de Darcy-Weisbach y el tamaño medio de las partículas del material del fondo del cauce. La ecuación obtenida para el coeficiente de rugosidad de Manning básicamente relaciona el régimen del lecho con el tamaño del sedimento del cauce.

En observaciones realizadas por Strickler logró determinar que el coeficiente de rugosidad de Manning varía con la raíz sexta de la altura de rugosidad, “K”, en donde esta rugosidad representa el tamaño medio del material D50. $n=0.047 D_{50}^{1/6}$ es la fórmula de Strickler deducida de sus observaciones donde “D” esta expresada en metros y el coeficiente de rugosidad de Manning en seg/m^{1/3}.

En Venezuela Posada (1998) basado en diversos estudios realizados en los departamentos de Antioquia y Risaralda propone una ecuación en función del D50, aunque existe un gran número de fórmulas para el valor del coeficiente de rugosidad de Manning con diámetros característicos como D65, D80, D90. La ecuación propuesta por Posada es la siguiente:

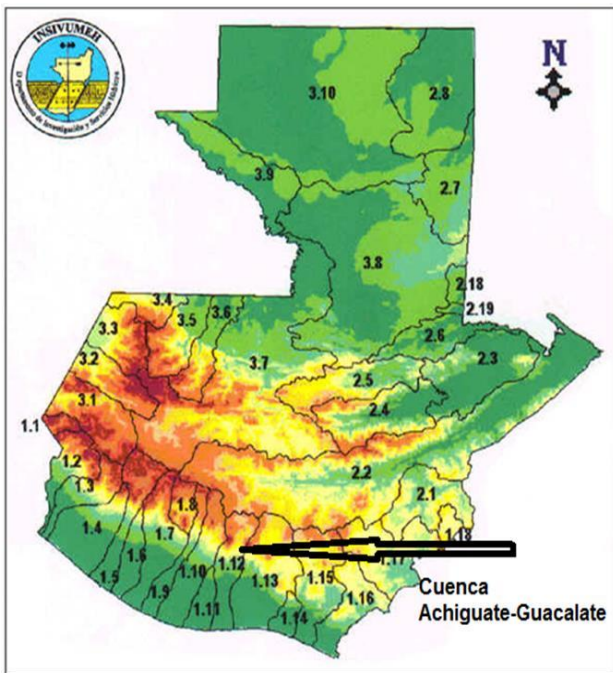
$$n=0.0487 D_{50}^{1/6} \quad (3)$$

También en Venezuela en un estudio realizado en ríos caudalosos la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo determinó valores para el coeficiente de rugosidad de Manning en función del diámetro medio de las partículas y como resultado de la investigación determinaron una ecuación para: $n=0.0336K^{1/6}$ con “K” como diámetro medio (D₅₀).

Metodología

El área de estudio de esta investigación se realizó en la cuenca del río Achiguate-Guacalate, la cual pertenece a la vertiente del Océano Pacífico, cuya localización se puede observar en la figura 1. La cuenca del río Achiguate-Guacalate se denomina Guacalate en la parte alta de la cuenca hasta la parte media, en la parte baja hasta su desembocadura se denomina Achiguate.

Figura 1. Mapa de ubicación cuenca rio Guacalate-Achiguate



Para desarrollar el método, el coeficiente “C_{CH}” de Chezy se relacionó con el coeficiente de rugosidad de Manning según se observa en la ecuación 4:

$$C_{CH} = \frac{1}{n} R_h^{1/6} \quad (4)$$

Donde:

R_h = Radio hidráulico (m)

Para eliminar el coeficiente de Chezy “C_{CH}”, se iguala la ecuación 4 con la ecuación 5 de Chezy “C_{CH}”:

$$c_{CH} = 18 \text{ Log} \left(\frac{12.2 R_h}{k} \right) \quad (5)$$

Donde:

K = Diámetro medio de las partículas de fondo

Se despeja “n” y se obtiene la ecuación 6:

$$n = \left(\frac{R_h^{1/6}}{18 \text{ Log} \left(\frac{12.2 R_h}{k} \right)} \right) \quad (6)$$

Para obtener el modelo se multiplica ambos lados de la ecuación anterior por K^{1/6} y se obtiene “n”

$$n = \left[\frac{\left(\frac{R_h}{K} \right)^{1/6}}{18 \text{ Log} \left(\frac{12.2 R_h}{k} \right)} \right] K^{1/6} \quad (7)$$

De la ecuación 7,

$$\text{Si, } \emptyset \left(\frac{R_h}{K} \right) = \left[\frac{\left(\frac{R_h}{K} \right)^{1/6}}{18 \text{ Log} \left(\frac{12.2 R_h}{k} \right)} \right] \quad (8)$$

Como resultado se obtiene el modelo para “n”

$$n = \emptyset(R_h/K) K^{1/6} \quad (9)$$

Donde $\emptyset(R_h/K)$ se toma del valor medio del conjunto de datos y “K” es el D₅₀ que se obtiene del análisis granulométrico del material del fondo del cauce.

Pasos para la aplicación del Modelo

Habiendo establecido el modelo general se proponen los siguientes pasos para formular el modelo específico de “n” para la cuenca del río basados en la información de todas las estaciones de aforo de la cuenca:

- Cálculo preliminar de “n”.
- Cálculo preliminar de “K”.
- Cálculo de la relación R_h/K.
- Cálculo de $\emptyset(R_h/K)$.
- Grafica de $\emptyset(R_h/K)$ Vs R_h/K.
- Se obtiene el valor medio de $\emptyset(R_h/K)$ de la gráfica.
- Con el valor medio de $\emptyset(R_h/K)$ se propone el modelo según ecuación 6.

Recopilación de información

Se recopilamos 113 datos de aforos proporcionados por el INSIVUMEH con información de los parámetros hidráulicos y geométricos a partir del año 2002 hasta el año 2016 distribuidos dentro de las siguientes estaciones:

- Guacalate
- Alotenango
- San Luis Las Carretas
- San Juan Gascón

- Alotenango II
- Cenizas

Resultados

Aplicación del modelo

Con los datos del 11 de julio de 2002 de la estación San Luis Las Carretas se ejemplifica el proceso de cálculo:

$$R_h = 0.165 \text{ m. } V = 0.50 \text{ m/seg. } S = 0.80 \%$$

Para todas las estaciones ubicadas en la cuenca del río se tomaron los aforos realizados en cada una de ellas. Luego se siguieron los pasos que a continuación se describen para obtener finalmente y como consecuencia de los cálculos obtenidos la gráfica $\phi(R_h/K)$ con R_h/K y el valor medio de $\phi(R_h/K)$.

Cálculo preliminar de n

Se calcula preliminarmente un valor de “n” para cada aforo realizado de acuerdo con la metodología propuesta utilizando la ecuación 10:

$$n = \frac{1}{V} * R_h^{2/3} * S^{1/2} \quad (10)$$

Sustituyendo datos se obtuvo:

$$n = \frac{1}{0.50} * 0.166^{2/3} * 0.0080^{1/2} = 0.055$$

Altura de rugosidad “K”

Partiendo de la ecuación 6, se desarrolló la ecuación 11 para el cálculo de “K”.

$$K = \frac{12.2 R_h}{10^{(R_h^{1/6}/18n)}} \quad (11)$$

Sustituyendo datos en la ecuación 11 se obtiene:

$$K = \frac{12.2 * 0.17}{10^{(0.166^{1/6}/18 * 0.055)}} = 0.349$$

Relación (R_h/K)

Con los datos obtenidos, se calculó la relación R_h/K de la manera siguiente:

$$R_h/K = \frac{0.166}{0.349} = 0.475$$

Cálculo de $\phi(R_h/K)$

El valor de $\phi(R_h/K)$ se calculó a partir de la ecuación 8, donde al sustituir datos se obtiene:

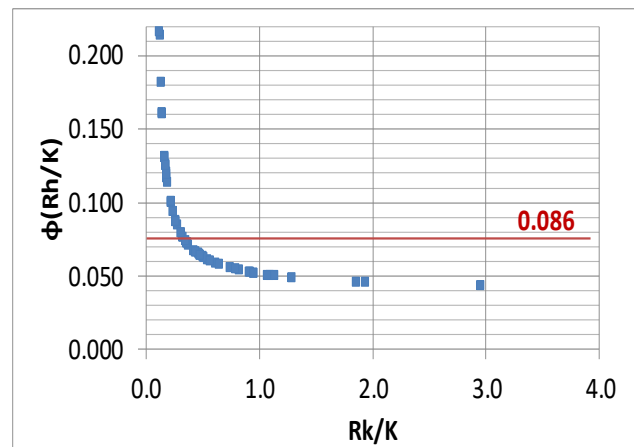
$$\phi\left(\frac{R_h}{K}\right) = \left[\frac{\left(\frac{0.166}{0.349}\right)^{1/6}}{18 \text{Log}\left(\frac{12.2 * 0.166}{0.349}\right)} \right] = 0.064$$

Con el procedimiento anterior se determinó de igual forma para cada aforo realizado, obteniéndose un valor de $\phi(R_h/K)$.

Con este valor calculado para todos los datos y R_h/K se desarrolló una gráfica con la cual se obtuvo el valor medio de $\phi(R_h/K)$.

En las figuras 2, 3 y 4 se elaboraron las gráficas para diferentes grupos de datos. Estos datos se dividieron en dos grupos, el primer grupo comprende del año 2002-2010 (ver figura 2).

Figura 2. Datos para años 2002-2010



El valor medio para $\phi(R_h/K)$ en la figura 2 es 0.086

El segundo grupo: datos del año 2011 a 2016 se muestran en la figura 3.

De la figura 3 se establece que el valor medio para $\phi(R_h/K)$ es 0.097

Finalmente se hizo un análisis con la totalidad de los datos 2002-2016 (ver figura 4).

El valor medio para $\phi(R_h/K)$ según la figura 4 es 0.091.

Figura 3. Datos para años 2011-2016

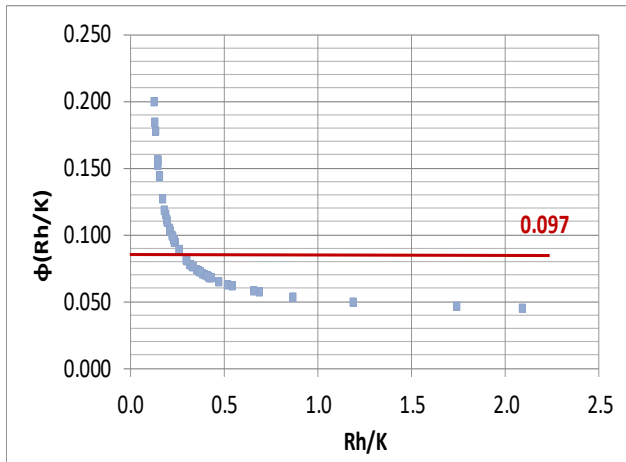
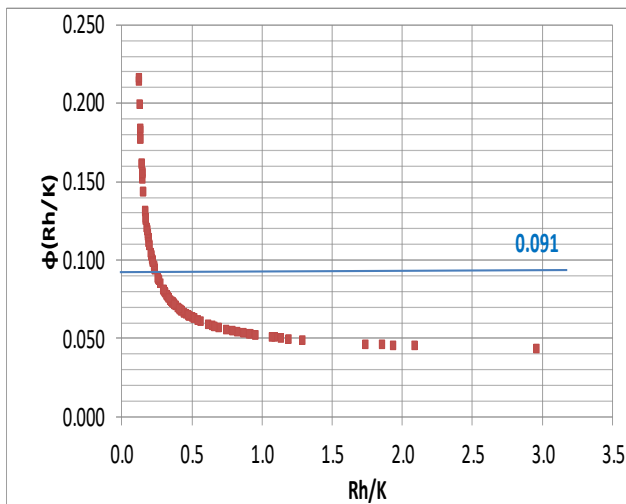


Figura 4. Datos para años 2002-2016



Con la información de la figura 4 se formuló el modelo de “n” para la cuenca en estudio.

$$n = 0.091 K^{1/6} \quad (12)$$

Validación del modelo

Para validar el modelo propuesto fue necesario conocer “K”, que representa la altura de rugosidad media del fondo del río.

Para poder realizar los muestreos granulométricos y determinar la altura de rugosidad se tomó en cuenta las metodologías existentes, las cuales varían según el tipo de material del cauce.

La toma de muestras granulométricas en ríos aluviales es el punto de partida en cualquier estudio sobre dinámica fluvial y para el caso del presente artículo fue básico y fundamental escoger el procedimiento adecuado acorde al tipo de material encontrado.

Los resultados que se obtuvieron a partir de la granulometría de las muestras seleccionadas se utilizaron en el cálculo de la resistencia al flujo aplicando el modelo propuesto en el presente artículo.

Se tomaron varias muestras del material de fondo del cauce en tres puntos diferentes y determinando su diámetro medio “K”, se calculó el valor de “n”. El “K” para el punto muestreado en Alotenango es de 0.27, obteniéndose entonces de la ecuación 9.

$$n = 0.091 * 0.27^{1/6}$$

$$n = 0.073$$

Para calcular el coeficiente de rugosidad de Manning se dispone de algunos métodos visuales, como las tablas publicadas por el U.S Department of Agriculture en 1955 o los estudios de Chow de 1959, así como una serie de fotografías que muestran valores típicos del coeficiente de rugosidad de Manning para un determinado tipo de canal.

También existen los métodos analíticos como el de Manning, el método de área-velocidad y el método que utiliza la curva de descarga el cuál utilizó Pastora (2010) en su estudio “Evaluación de la fórmula de Manning en el rio Ostúa”

En la tabla 1 y 2 se resumen y comparan los valores del coeficiente de rugosidad de Manning obtenidos por métodos como el de Chow (2004) en “Hidráulica de Canales Abiertos” entre otros.

Tabla 1. Valores del coeficiente de rugosidad de Manning para métodos visuales

Métodos visuales	"n" propuesto
Ven Te Chow	0.040
S.M. Woodward and C.J Posey	0.040
Luis Cea 1	0.040
U.S Department of Agriculture	0.040

Tabla 2. Valores del coeficiente de rugosidad de Manning para métodos analíticos

Métodos analíticos	"n" propuesto
Manning	0.087
Área-velocidad	0.074
Modelo estudio especial (media)	0.075

La formulación del modelo se realizó con los datos correspondientes a los años 2002 a 2016. La estación Alotenango II fue seleccionada para estimar el coeficiente de rugosidad de Manning. Luego para

comparar los resultados del modelo se tomaron aforos posteriores al periodo de formulación de este.

En las estaciones de la cuenca Achiguate-Guacalate, en el año 2017 el INSIVUMEH realizó una campaña de aforos, cuyos resultados se presentan en la tabla 3, de los cuales se tomaron los correspondientes a la estación Alotenango II, en donde se realizaron 2 aforos, uno en el mes de julio y otro en septiembre de donde se obtuvo el valor del coeficiente de rugosidad directamente de la ecuación de Manning.

Tabla 3. Aforos INSIVUMEH 2017. Estación Alotenango II

Estación	Fecha	Area (m2)	Perimetro mojado (m)	Radio hidráulico (m)	Profundidad máxima (m)	Velocidad media (m/seg.)	Caudal (m2/seg.)	n (m/seg3)
Alotenango II	7/09/2017	2.790	6.760	0.410	0.750	0.540	1.490	0.124
Alotenango II	24/07/2017	0.830	6.580	0.430	0.700	0.500	1.410	0.137

El 29 de Julio de 2018 se realizó un aforo con molinete en la misma estación Alotenango II para un estudio de tesis del estudiante Didier Fernández y se obtuvo un valor para “n” de 0.162, también calculado directamente de la ecuación de Manning.

En la tabla 4 se resume y comparan los resultados del modelo con los aforos de INSIVUMEH 2017 y del estudio de tesis de Fernández, D. (2018).

Tabla 4. Comparación del modelo con aforos recientes.

Responsable del aforo	Fecha	n	
		Nuevo Aforo	Modelo
INSIVUMEH	7/09/2017	0.124	0.073
INSIVUMEH	24/07/2017	0.137	0.073
Didier Fernández	29/07/2018	0.162	0.073

más elevado entre 0.074 y 0.087, y el modelo estimó “n” en 0.075, muy cercano al obtenido por el método de área-velocidad.

Como se puede observar en la tabla 4, los datos de INSIVUMEH y los del estudio de tesis de Didier Fernández son similares, proporcionando valores para “n” bastante altos comparados con el del modelo y con los métodos visuales que estiman un valor para “n” de 0.040.

Al analizar los datos del período 2002-2010 mostrados en la figura 2 y del período de 2011-2016 de la figura 3 se puede observar que la media de $\emptyset(R_h/K)$ varía incrementándose de 0.86 a 0.97, respectivamente, lo que significa que el valor de resistencia al flujo provocado por el cauce se incrementó en esta última década.

Una posibilidad de que este valor se haya incrementado puede deberse a que los cauces están siendo afectados por descargas de desechos sólidos provenientes de los poblados cercanos. Este factor puede observarse al hacer un recorrido a lo largo de la cuenca.

Discusión de resultados

Como se puede observar en la tabla 1, para los métodos visuales el valor de “n” se estimó en 0.040, mientras los métodos analíticos proporcionan un valor

Conclusiones

El modelo para determinar el coeficiente de rugosidad de Manning propuesto en el presente artículo proporciona resultados similares a los que se obtienen por los métodos analíticos. Por este método el valor de "n" obtenido es de 0.075, por el método área-velocidad es 0.074 y por el método Manning 0.087. Por los métodos visuales el valor es de 0.040, bastante menor a los métodos analíticos y al método del presente artículo. Considerando lo anterior, el ingeniero debe elegir de acuerdo con su experiencia el valor del coeficiente de rugosidad.

Los aforos realizados posteriores a la propuesta del modelo proporcionan un coeficiente de rugosidad calculado directamente de la ecuación de Manning variando entre 0.124 a 0.162 (ver tabla 3), que sugieren que este valor sigue incrementándose respecto de los años anteriores. Para los años 2011-2016 se obtiene $n = 0.078$ y para los años 2002-2010 $n = 0.069$ ambos estimados con el modelo propuesto en el presente artículo.

Referencias

- Fernández, J. (2019). Modelo para el cálculo del coeficiente de rugosidad de Manning en función de la altura del material del fondo del cauce, del río Achiguate-Guacalate. [Tesis de Maestría, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Guatemala.
- Fernández, D. (2018). Calibración de un molinete de aspas para la realización de un aforo por vadeo de un cauce pequeño. [Trabajo de graduación ingeniero civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Guatemala.
- Fuentes, R. y López, J. (1979). Determinación numérica de Manning en un tramo de canal de longitud arbitraria. Laboratorio Nacional de hidráulica. Caracas, Venezuela.
- Karim, F. (1990). Menu of coupled velocity and sediment discharge relations for rivers. *Journal of hydraulic engineering*. 116. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1990\)116:8\(978\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)116:8(978))
- Pastora, D. (2010). Evaluación de la fórmula de Manning en el río Ostúa. [Tesis de Maestría, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Guatemala.
- Posada, J. (1998). Determinación del coeficiente de rugosidad en canales naturales. Facultad de minas, Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.
- Chow, V.T. (2004). Hidráulica de Canales Abiertos. Editorial Mc Graw Hill. 655 p. Saldarriaga, Juan G. (trad.), Zuluguaga Ángel, Antonio (Rev.Tec.), Editorial Norma S.A. Colombia. Disponible en: <http://www.hidrojing.com/wp-content/uploads/Bibliografia/2>

Agradecimientos

A la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, a la Facultad de Ingeniería, al Laboratorio de Suelos ambos de la Universidad de San Carlos de Guatemala y al Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología por el apoyo dado para el desarrollo de la investigación.