

La ecuación de resistencia al flujo en canales y el aforador de garganta larga (AGL)

Mauro Íñiguez-Covarrubias

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Carlos Díaz-Delgado
Khalidou Mamadou Bâ

Universidad Autónoma del Estado de México

En este trabajo se comparan dos criterios para determinar el coeficiente C de Chézy de la ecuación de resistencia al flujo, con aplicación en el cálculo del gasto en canales prismáticos con flujo permanente y uniforme. Estos criterios son el coeficiente de rugosidad n de Manning, y otro que se determina por la ecuación de Nikuradse modificada. El método de comparación se inicia con la determinación de los gastos; en un primer caso para un canal con revestimiento de concreto y en un segundo ejemplo para un canal con revestimiento de mampostería. Estos resultados se validan con base en la propuesta metodológica aquí presente, la cual consiste en comparar los gastos determinados según los dos criterios contra los obtenidos a través del AGL, estructura diseñada y adaptada para operar en las condiciones idénticas a las del canal de referencia en el punto de aforo. Los resultados de la comparación muestran que el gasto determinado con la ecuación de Nikuradse modificada es igual al determinado con el AGL en los dos casos, siendo además menor en 12 y 32%, según el aumento del coeficiente de rugosidad n de Manning. Por los resultados obtenidos, y con base en la propuesta metodológica, se concluye que la utilización del criterio del coeficiente de rugosidad n de Manning sobrestima los gastos. Por lo tanto, se recomienda que para estas condiciones de funcionamiento, los canales se diseñen bajo el criterio de la ecuación de Nikuradse modificada.

Palabras clave: coeficiente de Chézy, diseño de canales, aforador de garganta larga (AGL).

Introducción

Para el diseño de un canal de riego es necesario determinar, en primer término, el gasto por conducir (Íñiguez *et al.*, 2007). Posteriormente se selecciona el tipo idóneo de recubrimiento y, luego de conocer las condiciones de alojamiento de la cubeta, se aplican los conocimientos viables de la mecánica de fluidos. Normalmente, el canal se diseña para condiciones de funcionamiento en flujo permanente y uniforme, donde se cumple la ecuación de la conservación de la masa. Se aplica entonces la ecuación de resistencia al flujo;

actualmente se utiliza el criterio de n de Manning para determinar C de Chézy.

En la operación de los sistemas de riego suele detectarse la falta de capacidad de conducción de los canales. Esto es, un gasto diferente al señalado en el diseño, con la consecuente falta de flexibilidad en la distribución del agua (Íñiguez *et al.*, 2007). Una de las posibles causas puede ser de carácter estructural; es decir, que en el valor del coeficiente C de Chézy exista error de estimación. Es ésta, de tal modo, la oportunidad de estimar la diferencia en dicho gasto, y para ello se propone la siguiente metodología.

Revisión de literatura

En la revisión bibliográfica sobre los criterios para determinar el coeficiente C de Chézy se destaca un aspecto de la historia de la ecuación de n de Manning (Chow, 1959), donde se describe que, por resultados de análisis dimensional, la ecuación de resistencia al flujo en canales con dicho criterio no es dimensionalmente homogénea. Sin embargo, al parecer este criterio no ha sido suficientemente convincente y la mencionada ecuación sigue utilizándose.

Buscando aplicar un coeficiente con el cual la ecuación de resistencia sea dimensionalmente homogénea, se encontró que las ecuaciones para determinarlo se basan, como en el caso de las tuberías, en integrar la curva que representa el perfil de la distribución de la velocidad. Éste, bajo ciertas suposiciones, varía logarítmicamente (White, 1994). Por otra parte, durante muchos años se experimentó en el mismo sentido hasta que Nikuradse integró resultados propios y ajenos, construyendo una ecuación útil para determinar el coeficiente f , que lleva su nombre en su honor (Sotelo, 1979).

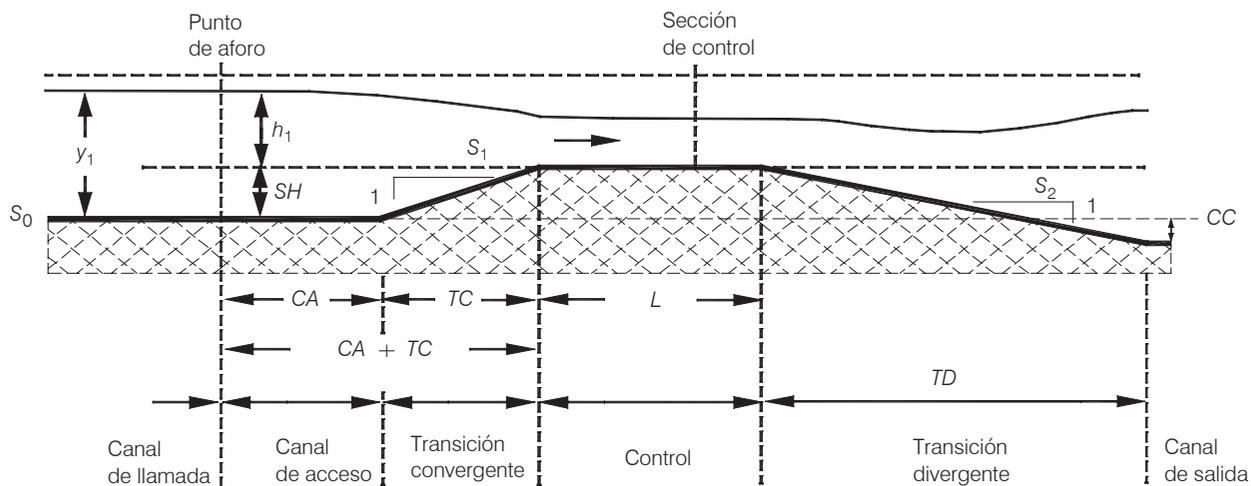
Bajo la suposición de que el perfil de la distribución de la velocidad varía logarítmicamente y la velocidad máxima está en la superficie, tal como sucede para el caso de canales anchos y de sección rectangular, se obtuvo una ecuación de tipo Nikuradse, recomendada por la ASCE en 1963 (Henderson, 1966). En otros trabajos se encuentran expresiones semejantes, con justificaciones matemáticas que incluyen el tipo de formato de esta ecuación, propuestas posteriormente por otros autores (Aldama y Ocón, 2002).

Para el caso de la ecuación Nikuradse (Sotelo, 1979), se sustituye $D_h = d$ y cambiando 3.0 por 3.7, que es la ecuación recomendada por la ASCE para aplicaciones en canales (Henderson, 1966) (en este documento se le llama Nikuradse modificada). El coeficiente f se obtiene en la ecuación (1):

$$f = \left(2.0 \log_{10} \frac{3.0 D_h}{\epsilon} \right)^{-2} \quad (1)$$

Por otra parte, respecto al aforo en canales y estructuras de extracción, entre otros existe el AGL

Ilustración 1. Partes constituyentes del aforador de garganta larga (AGL).



donde:

- y_1 = tirante normal a la entrada del canal (m).
- h_1 = tirante en el punto de aforo (m).
- SH = altura del escalón (m).
- S_1 = pendiente de la rampa de entrada (m).
- S_2 = pendiente de la rampa de salida (m).
- CC = caída del canal (m).
- CA = longitud del canal de acceso (m).
- TC = longitud del canal de convergencia (m).
- L = longitud de la sección de control (m).
- TD = longitud del canal de divergencia (m).

(ilustración 1), estructura rígida que forma, con una reducción lateral y vertical, una sección contraída dentro del canal. Por medio de dicha sección se simulan las condiciones que presentan las condiciones reales de la energía mínima con un régimen crítico. El diseño y los requerimientos de instalación se muestran en el manual USBR de 2007, versión 1.05.0029 (USDI, 1997).

Desarrollo

El desarrollo metodológico para comparar los dos criterios de estimación del coeficiente C de Chézy de la ecuación de resistencia al flujo se inicia con la determinación de los gastos; en el caso 1, para un canal con revestimiento de concreto, y en el caso 2, para un canal con revestimiento de mampostería. Estos resultados se comparan con los obtenidos a través del AGL, diseñado y adaptado para operar en las condiciones idénticas a las del canal en el punto de aforo. Como condición metodológica se debe cumplir que y_1 , es decir, el tirante normal del canal sea la suma del tirante h_1 y SH la altura del escalón, ubicados a la entrada del AGL (ilustración 1).

Determinación de C de Chézy y del gasto

Determinar el gasto que conduce un canal rectangular con base $b=2.438$ m, tirante del agua, $h=1.219$ m y pendiente del canal $S=0.0008$, primero con revestimiento de concreto y en un segundo caso con revestimiento de

mampostería, se considera ν viscosidad cinemática del agua para 20 °C. El valor es igual a $1.0 \cdot 10^{-6}$ m²/seg.

a) El coeficiente de Chézy con n de Manning es $C = \frac{R_h^{1/6}}{n}$ (Sotelo, 1979). Con aplicación para revestimiento de concreto $n=0.012$ de Manning, y para revestimiento de mampostería $n=0.020$ (White, 1994). Se determinan área, perímetro mojado, radio hidráulico, velocidad y gasto. Los resultados se muestran en el cuadro 1.

b) El coeficiente de Chézy con la ecuación f de Nikuradse modificada es $C = \left(\frac{8g}{f}\right)^{1/2}$ (White, 1994). Con

aplicación de $\epsilon=1$ (altura promedio de la rugosidad, o sea mm) para la ecuación Nikuradse modificada, para revestimiento de concreto y para revestimiento de mampostería, es $\epsilon=80$ (White, 1994). Se determinan área, perímetro mojado, radio hidráulico, velocidad y gasto (cuadro 1). Los resultados se muestran también en ese mismo cuadro.

Diseño del AGL y determinación del gasto

Para el diseño del AGL se consideran las condiciones idénticas a las del canal en el punto de aforo: un canal rectangular de base $b=2.438$ m; pendiente de $S=0.0008$; tirante del agua de $h=1.219$ m, revestido de concreto para el primer caso y de mampostería para el segundo. Derivadas del diseño para los dos casos del AGL se muestran los resultados de las dimensiones resultantes (cuadro 2).

Cuadro 1. Resumen del cálculo del gasto.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Caso de estudio	Revestimiento del canal	Coficiente	A	R_h	C	V_0	Q	ΔQ
1	Cemento pulido	n de Manning 0.012	2.97	0.61	76.73	1.695	5.03	12%
		Nikuradse modificada $\epsilon=1$	2.97	0.61	68.47	1.512	4.49	
2	Mampostería	n de Manning 0.020	2.97	0.61	46.04	1.240	3.02	32%
		Nikuradse modificada $\epsilon=80$	2.97	0.61	34.75	0.768	2.28	

donde:

Área hidráulica $A=b \cdot h$ (m²).

Radio hidráulico $R_h = \frac{A}{P}$ (m).

Perímetro mojado $P=b+2 \cdot h$ (m).

Velocidad media $V_0 = C \cdot \sqrt{R_h S_0}$ m/s.

$Q=A \cdot V_0$ m³/s.

Diámetro hidráulico $D_h=4 \cdot R_h$ (m).

Aceleración de la gravedad g (m/s²).

$\Delta Q = \left(\frac{Q_M}{Q_N} - 1\right) = \text{en \% es la relación de } Q_M \text{ gasto por Manning respecto a } Q_N \text{ gasto por la ecuación de Nikuradse modificada.}$

Cuadro 2. Diseño y dimensiones del aforador de garganta larga.

Condición inicial		Condición del aforador				Gasto real	Dimensiones del AGL (m)							
1	2	3	4	5	6	7	SH	S1	S2	CC	CA	TC	L	TD
Caso de estudio	Tirante normal y_1	Q_N	h_1	Q_a	% error	Q_r								
1	1.219	4.50	0.969	4.884	-2.12	4.58	0.25	3.6	6.0	0.50	4.0	0.9	3.7	4.5
2	1.219	2.29	0.669	2.395	-3.27	2.31	0.55	3.27	6.0	0.50	2.5	1.8	2.5	6.3

donde:

y_1 = tirante normal a la entrada del canal (m).

h_1 = tirante en el punto de aforo (m).

Q_N = m³/s gasto calculado con f de Nikuradse modificada.

Q_a = m³/s gasto calculado por ecuación del AGL.

Q_r = m³/s gasto real $Q_r = Q_a + Q_a \cdot \text{error en \%}$.

La ecuación que relaciona el gasto con el tirante para el AGL caso 1, o sea el canal revestido de concreto, resulta ser $Q_a = 4.932 \cdot h_1^{1.633}$, con un error esperado de $\pm 2.12\%$ del $Q_{m\acute{a}x}$. Para el AGL caso 2, o sea el canal con revestimiento de mampostería, la ecuación resultó ser $Q_a = 4.467 \cdot (h_1 + 0.0137)^{1.628}$, con un error esperado de $\pm 3.27\%$ del $Q_{m\acute{a}x}$ (cuadro 2).

Análisis de los resultados

Al hacer la comparación de gastos determinados entre los dos criterios, se encontró que los determinados por la ecuación f de Nikuradse modificada son menores en 12 y 32%, según el aumento del coeficiente de rugosidad n de Manning (cuadro 1).

Los resultados de la comparación muestran que el gasto determinado con la ecuación de Nikuradse modificada es aproximadamente igual al determinado con el AGL para el caso 1; el gasto determinado con la ecuación f de Nikuradse modificada es $Q_N = 4.50$ m³/s y el gasto determinado con AGL es $Q_r = 4.58$ m³/s (cuadro 2). En el caso 2 sucede lo mismo: el gasto determinado con la ecuación f de Nikuradse modificada es $Q_N = 2.29$ m³/s, y el determinado con AGL es $Q_r = 2.31$ m³/s (cuadro 2).

Conclusiones y recomendaciones

Se concluye que la propuesta metodológica presentada y utilizada para validar el coeficiente de Chézy es modestamente ingeniosa y que proporciona resultados difíciles de verificar mediante un simple análisis matemático y experimental. Además, tal propuesta

puede ser ampliada para verificar otras condiciones de revestimiento, ya que la ϵ (altura promedio de la rugosidad, en mm) para f de Nikuradse modificada puede medirse y la única variable por resolver es el coeficiente C de Chézy.

Finalmente, los resultados obtenidos en esta investigación permiten recomendar que los canales, en especial los de riego agrícola, se diseñen con la ecuación f de Nikuradse modificada, ya que el gasto de conducción es una relación de la flexibilidad en la distribución del agua y, por lo tanto, no debe utilizarse un criterio deficitario para determinar el gasto de diseño.

Recibido: 26/09/2007

Aprobado: 14/04/2008

Referencias

- ALDAMA, A. y OCÓN, R. A. Resistencia al flujo en canales y límites de aplicabilidad de la fórmula de Manning, *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XVII, núm. 1, enero-marzo de 2002, pp. 107-115.
- ASCE. Task Force of Hydromechanics Committee. *Friction Factors in Open Channels*. *Journal Hydraulics Division*. ASCE. Vol. 89, 1963, pp. 97-143.
- CHOW-HOW, V. T. *Open Channel Hydraulics*. New York: McGraw-Hill, 1959.
- HENDERSON, F.M. *Open Channel Flor*. New York: Macmillan, 1966.
- ÍÑIGUEZ, M., DE LEÓN, B., PRADO, J. y RENDÓN, L. Análisis y comparación de tres métodos para determinar la capacidad de conducción de canales, aplicados en

- el distrito de riego La Begoña. *Ingeniería hidráulica de México*. Vol. XXII, núm. 2, abril-junio de 2007, pp. 81-90.
- LEVY, E. *Mecánica de los fluidos*. México, D.F.: Instituto de ingeniería, UNAM, 1957, 266 pp.
- SOTELO-ÁVILA, G. *Hidráulica general*. México D.F.: Limusa, 1979, 277 pp.
- USDI. *Water Measurement Manual*. Bureau of Reclamation. Third edition. Denver: U.S. Govern Printing Office, U.S. Department of Interior, 1997.
- USBR *User's Manual for the Winflume* (version 1.05.0029) U.S. Bureau of Reclamation [en línea] http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/winflume/index.html, 2007.
- WEBBER, N.B. *Fluid Mechanics for Civil Engineers*. Chapam and Hall, 1971, 330 pp.
- WHITE, M.F. *Fluid Mechanics*. Third edition. McGraw Hill Inc., 1994, 736 pp.

Abstract

ÍÑIGUEZ-COVARRUBIAS, M., DÍAZ-DELGADO, C. & BÂ, K.M. *The flow resistance equation in canals and the long-throat flume*. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XXIV, no. 1, January-March, 2009, pp. 125-130.

This paper compares two criteria for determining Chézy's coefficient C of the flow resistance equation, applied to the calculation of flow in prismatic canals with a permanent and uniform flow. These criteria are Manning's rugosity coefficient n and another one determined by Nikuradse's modified equation. The comparison method starts with the determination of flows; in a first case for a concrete-lined canal, and in a second example for a masonry-lined canal. These results are validated based on the methodology herein presented, which consists in comparing flows determined by means of both criteria against those obtained using the long-throat flume, a structure designed and adapted for operating in identical conditions to those of the reference canal at the gauging point. The results of the comparison show that the flow determined with Nikuradse's modified equation is the same as that determined with the long-throat flume in both cases, being besides lower by 12% and 32%, according to the increase of Manning's rugosity coefficient n. From the results, and based on the proposed methodology, it is concluded that the use of Manning's rugosity coefficient n criterion overestimates flows. Therefore, it is recommended that for these operation conditions, canals be designed with the criterion of Nikuradse's modified equation.

Keywords: Chézy's coefficient, canal design, long-throat flume.

Dirección institucional de los autores:

Dr. Mauro Íñiguez-Covarrubias

Especialista en hidráulica
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532
Colonia Progreso
62550 Jiutepec Morelos, México
Teléfonos: + (52) (777) 319 4220 y 329 3600, extensión 195
mic@tlaloc.imta.mx

Dr. Carlos Díaz-Delgado

Profesor titular
Centro Interamericano de Recursos del Agua
Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma del Estado de México
Cerro de Coatepec s/n
Toluca, México
teléfono: + (52) (722) 296 5550
cdiaz@uaemex.mx

Dr. Khalidou Mamadou-Bâ

Profesor titular
Centro Interamericano de Recursos del Agua
Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma del Estado de México
Cerro de Coatepec s/n
Toluca, México
teléfono: + (52) (722) 296 5550
khalidou@uaemex.mx