

Medidas de la Rugosidad en Canales Naturales

Por: *Rodrigo Cano Gallego*

1. INTRODUCCION

Con base en un trabajo experimental sobre flujo uniforme en canales efectuado por Rodrigo Cano Gallego en el laboratorio de hidráulica de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, con la colaboración de varios estudiantes, se encontró que la ecuación más adecuada para el cálculo del flujo uniforme en canales es la conocida como de Chezy, pero utilizando un coeficiente C variable, para el cual se obtuvieron ecuaciones.

El trabajo experimental se efectuó en canales de sección rectangular, triangular y trapezoidal, a los cuales se pegaron en el fondo y paredes materiales aluviales de tamaño conocido. Se procedió en forma similar al trabajo efectuado por J. Nikuradse en tuberías.

La experimentación se efectuó en un canal rectangular de 0,80 m de ancho y 14 m de largo, al cual posteriormente se cambió la forma a triángulo y trapecio. Los materiales para producir la rugosidad de la superficie variaron desde arenas con 0,6 mm de tamaño hasta cascajo con 19,1 mm. Se experimentó con superficie en concreto muy liso a la cual se le determinó indirectamente la rugosidad como 0,14 mm.

Los caudales experimentales variaron entre 3 y 110 litros/segundo. Este trabajo tiene por objeto comprobar que las ecuaciones obtenidas en el canal experimental de laboratorio, son aplicables a canales naturales de cualquier tamaño, forma y rugosidad.

2. ECUACIONES PARA EL CALCULO DEL FLUJO UNIFORME.

Las ecuaciones propuestas para el cálculo del flujo uniforme en canales son:

Para el cálculo de la velocidad media la ecuación de Chezy o de Darcy-Weisbach esta ecuación puede obtenerse mediante planteamiento de equilibrio de fuerzas en el canal en estado de flujo uniforme.

$$V = C \sqrt{R S} \quad (1)$$

$$C = \sqrt{8 g / f} \quad (2)$$

En donde:

- V = Velocidad media
- R = Radio hidráulico
- S = Pendiente del canal
- C = Coeficiente de Chezy
- g = Aceleración de la gravedad, $g = 9,78 \text{ m/s}^2$ para Medellín.
- f = Factor de fricción de la ecuación Darcy-Weisbach.

El factor de fricción para canales con rugosidad igual o mayor a 2 mm se calcula con las ecuaciones:

$$1 / \sqrt{f} = a (-\log (1,34 a) + \log (4 R/k)) \quad (3)$$

$$a = 5,7798 K^{0,139633} \quad (4)$$

En donde k es la rugosidad de la superficie del canal expresada en metros, los factores a y f son adimensionales, y el radio hidráulico debe expresarse en metros.

Al igualar las ecuaciones de Chezy y Manning se obtiene la ecuación:

$$n = R^{1/6} / C \quad (5)$$

3. CALCULO DE LA RUGOSIDAD EN CANALES NATURALES.

3.1 Rugosidad compuesta.

Los canales naturales generalmente no poseen una rugosidad homogénea en toda su superficie. En muchos

casos son canales anchos con formas trapezoidales o aproximadamente rectangulares, y rugosidades diferentes en el fondo y las paredes. En estos casos puede calcularse una rugosidad media equivalente que represente toda la sección.

Al dividir la sección del canal en varias secciones parciales, cada una con un área A_i , perímetro P_i , rugosidad K_i , y suponer las velocidades medias V_i de las secciones iguales a la velocidad media de la sección total V . Se puede obtener la ecuación:

$$f_m = \left(\sum_{i=1}^N f_i P_i \right) / P \quad (6)$$

En donde f_m es el factor de fricción medio para toda la sección, f_i es el factor de fricción de cada sección

parcial, y P el perímetro total $P = \sum_{i=1}^N P_i$; para calcular los f_i se supone toda la sección del canal con rugosidad uniforme K_i .

En canales naturales o artificiales es posible medir la descarga Q , pendiente S , área y perímetro de la sección A , P . Con estos valores se pueden calcular C y f mediante las ecuaciones (1) y (2). Conocidos f y R se puede calcular K con las ecuaciones (3) y (4). Si se desea conocer el coeficiente n de Manning puede calcularse con la ecuación (5).

Al aplicar este procedimiento a un canal se obtiene la rugosidad media, cuando la superficie es heterogénea; o la rugosidad de la superficie en caso de que ésta sea homogénea.

3.2 Aplicación del procedimiento a medidas efectuadas por U.S. Geological Survey.

El Geological Survey de los Estados Unidos de Norteamérica desarrolló un método denominado "Fotográfico" para estimar el coeficiente n de Manning. Este método se basa en estimar el coeficiente n a partir de fotografías de canales de resistencia conocida, junto con un resumen de parámetros geométricos e hidráulicos que definen el canal para una descarga específica.

Según H.H. Barnes, los resultados de este método indican que ingenieros entrenados pueden estimar coeficientes de Manning con una certeza de $\pm 15\%$ bajo muchas condiciones.

Del libro "Hidráulica de canales abiertos" por Richard H. French se tomaron los datos de campo correspondientes a 18 aforos efectuados en 13 ríos de los Estados Unidos por el Geological Survey. Este libro presenta además las fotografías, descripción detallada de los canales, y estimativos de los coeficientes de Manning.

Todos los canales estudiados son considerados estables y siguieron el siguiente criterio:

- Los sitios se estudiaron después del paso de una avenida.
- El gasto pico se determinó con la medida del nivel máximo y relaciones gasto-nivel preexistentes.
- Las orillas del canal presentaban señas de los niveles máximos de la avenida y con éstos se definieron el perfil superficial del agua y el gasto pico.
- El gasto pico fue confinado dentro del canal.

Con la información de campo se obtienen la descarga o gasto Q , el área de la sección A , el perímetro, el ancho y la pendiente del canal S . Con estos valores se calculan la velocidad media $V = Q/A$, el radio hidráulico $R = A/P$, y la profundidad media $D = A/B$.

Con la ecuación (1) se calcula el coeficiente de Chezy C , y con la ecuación (2) $1/\sqrt{f}$.

La solución simultánea por "aproximaciones sucesivas" de las ecuaciones (3) y (4) permite obtener la rugosidad media del canal K .

Conocidos C y R se calcula n con la ecuación (5).

A continuación se presenta la descripción de cada uno de los canales estudiados los resultados obtenidos y comentarios sobre estos resultados. En cada canal y para cada aforo se presenta el coeficiente n estimado por los ingenieros del U.S. Geological Survey, y el valor calculado en este trabajo.

1. Ramificación india bajo la presa Atwood cerca a New Cumberland, Ohio, U.S.A.

Fecha de la avenida: Mayo 11, 1948
 Área de drenaje: 182 km²
 Caudal máximo: 21,7 m³/s
 Coeficiente de Manning estimado: $n = 0,026$

Descripción del canal: Fondo y bordos compuestos de arcilla. Bordes limpios con pasto corto y raíces de árboles en algunos lugares. Relación ancho profundidad media $B/D = 9,6$. Sección aproximadamente rectangular y de forma regular.

Coefficiente de Manning calculado: $n = 0,0260$

Rugosidad calculada: $K = 0,079 \text{ m}$

La rugosidad en este canal representa las irregularidades en la forma de la superficie del fondo y taludes, y el efecto de raíces de árboles en los taludes.

2. Salt Creek en Roca, Nebraska, U.S.A.

Fecha de la avenida: Mayo 2, 1954
 Area de drenaje: 451 km²
 Caudal máximo: 52,7 m³/s
 Coeficiente de Manning estimado: $n = 0,030$

Descripción del canal: Fondo de arena y arcilla. Taludes suaves y libres de vegetación durante el paso de la avenida. Relación ancho profundidad $B/D = 11,0$. Sección trapezoidal poco regular.

Coefficiente de Manning calculado: $n = 0,0283$
 Rugosidad calculada: $K = 0,122 \text{ m}$

La rugosidad en este canal debería ser similar al caso anterior pero está incrementada por la forma poco regular de la sección del canal.

3. Río Chamma de Chamita; Nuevo México, U.S.A.

Fechas de las avenidas: Marzo 24 y abril 3 de 1950
 Area de drenaje: 8.100 km²
 Caudal máximo: 30,0 m³/s; 19,4 m³/s.
 Coeficientes de Manning estimados: $n = 0,032$; $n = 0,036$

Descripción del canal: Fondo en arena y cascajo. El talud izquierdo en roca y

el derecho en cascajo. Relación ancho profundidad $B/D = 26,3$; 30,4. Sección rectangular con irregularidad en el fondo.

Coefficiente de Manning calculado: $n = 0,0325$; $n = 0,0347$
 Rugosidad calculada: $K = 0,107 \text{ m}$; $K = 0,106 \text{ m}$.

Este caudal es hidráulicamente ancho, la rugosidad promedio está definida por el material del fondo, los taludes tienen rugosidad similar al fondo, la rugosidad es homogénea, los hechos anteriores se manifiestan con un valor constante de rugosidad para los dos aforos.

4. Río Salt abajo de la presa Stewart Mountain, Arizona, U.S.A.

Fecha de la avenida: Marzo 24, 1950
 Area de drenaje: 16.000 km²
 Caudal máximo: 36,2 m³/s
 Coeficiente de Manning estimado: $n = 0,032$

Descripción del canal: Fondo y taludes compuestos por cantos rodados lisos con tamaño (0,10 - 0,25) m, diámetro medio 0,15 m. Algunas piedras grandes con diámetro máximo 0,46 m. Se midieron 7 secciones en el canal, entre las secciones 1-5 con espaciamiento 378 m, la pendiente del canal es 0,00146; entre las secciones 5-7 con espaciamiento 197 m la pendiente es 0,00275. Lo anterior obliga a calcular separadamente los dos sectores. Relación $B/D = 88,1$. Sección aproximadamente parabólica.

Coefficiente de Manning calculado: $n = 0,0332$ $n = 0,0338$
 Rugosidad calculada: $k = 0,084 \text{ m}$ $k = 0,073 \text{ m}$

La rugosidad calculada por los dos sectores es diferente porque el cambio de pendiente puede modificar un poco el tipo de material de fondo. Las rugosidades calculadas son inferiores al tamaño medio de las piedras del fondo, porque la rugosi-

dad representa la parte que la piedra sobresale del fondo.

5. Río Etowah, cerca a Dawsonville, Georgia, U.S.A.

Fecha de las avenidas: Enero 22, febrero 13, febrero 14, de 1959

Area de drenaje: 267 km²

Caudal máximo: 64,0; 52,4; 14,6 m³/s

Coefficiente de

Manning estimado: $n = 0,041$; $n = 0,039$; $n = 0,035$

Descripción del canal: Fondo en arena y cascajo con varios árboles caídos en el sector. Taludes casi verticales con árboles, raíces y maleza. Relación ancho profundidad B/D = 6,5; 6,9; 13,9. Sección rectangular.

Coefficiente de

Manning calculado: $n = 0,0412$; $n = 0,0391$; $n = 0,0372$

Rugosidad calculada: $K = 0,333$ m; $K = 0,283$ m; $K = 0,150$ m.

El coeficiente n disminuye al disminuir la profundidad, en forma contraria a como ocurre en un canal con rugosidad homogénea, lo anterior indica que la rugosidad de los taludes es apreciablemente mayor que la del fondo, y el valor de la rugosidad calculado corresponde a una rugosidad media de taludes y fondo.

La rugosidad disminuye al disminuir la profundidad y aumentar la relación B/D, con aumento de la influencia del fondo.

Los dos primeros caudales corresponden a un canal rectangular estrecho con gran influencia de los taludes, el tercer caudal corresponde a un canal ancho con poca influencia de los taludes.

6. Riachuelo Bull cerca de Ira, Texas.

Fecha de la avenida: Junio 1, 1948

Area de drenaje: 1.000 km².

Caudal máximo: 91,2 m³/s

Coefficiente de

Manning estimado: $n = 0,041$

Descripción del canal: Fondo con arena, cascajo y rocas angulares. Taludes irregulares erosionados y con espesa cubierta de pasto

y arbustos. Relación B/D = 15,0. Sección trapezoidal con fondo irregular.

Coefficiente de

Manning calculado: $n = 0,0448$

Rugosidad calculada: $K = 0,334$ m

La rugosidad calculada representa el efecto de las rocas y la irregularidad del fondo del canal.

7. Riachuelo Murder cerca a Monticello, Georgia, U.S.A.

Fecha de la avenida: Febrero 7, 1958

Area de drenaje: 62 km²

Caudal máximo: 23,8 m³/s

Coefficiente de

Manning estimado: $n = 0,045$

Descripción del canal: Fondo de arena y cascajo. Taludes con árboles y raíces arriba y abajo del nivel medio del agua. Relación B/D = 9,8. Sección irregular con taludes casi verticales.

Coefficiente de

Manning calculado: $n = 0,0472$

Rugosidad calculada: $K = 0,229$ m

Hay una fuerte influencia de los taludes y las irregularidades del fondo en el valor de la rugosidad media.

8. Río Provo cerca de Hailstone, Utah, U.S.A.

Fecha de las

avenidas: Junio 13, octubre 7, 1952

Area tributaria: 604 km²

Caudal máximo: 34,0; 1,8 m³/s

Coefficiente de

Manning estimado: $n = 0,045$; $n = 0,073$

Descripción del canal: Fondo y taludes compuestos por rocas lisas y redondeadas, tamaño medio aproximado 0,305 m. Relación B/D = 14,6; 37,6. Sección aproximadamente trapezoidal.

Coefficiente de

Manning calculado: $n = 0,0463$, $n = 0,0672$

Rugosidad calculada: $K = 0,194$ m; $K = 0,093$ m.

Los valores de la rugosidad calculados indican que los taludes son apreciablemente más rugosos que el fondo.

9. Riachuelo limpio cerca de Golden, Colorado, U.S.A.

Fecha de la avenida: Mayo 26, 1958
Area tributaria: 1.030 km²
Caudal máximo: 39,1 m³/s
Coeficiente de Manning estimado: $n = 0,050$
Descripción del canal: Fondo y taludes formados por rocas angulares con tamaño medio aproximado 0,61 m. Relación B/D = 13,1. Sección aproximadamente trapezoidal muy irregular.

Coeficiente de Manning calculado: $n = 0,0613$
Rugosidad calculada: $K = 0,270$ m.

La rugosidad calculada corresponde al efecto de las piedras del fondo y taludes.

10. Riachuelo Cache cerca de Lower Lake, California, U.S.A.

Fecha de la avenida: Julio 24, julio 25, 1951
Area de drenaje: 1.370 km²
Caudal máximo: 109; 51,8 m³/2
Coeficiente de Manning estimado: $n = 0,053$; $n = 0,079$
Descripción del canal: Fondo compuesto por grandes rocas angulares, taludes formados por roca expuestas, piedras y algunos árboles. Se tomaron tres secciones de control, el canal se estrecha apreciablemente de la sección 1 a la 3, por esta razón se calcularon separadamente los sectores 1-2 y 2-3. Relación ancho profundidad; sector 1-2 B/D = 13,4; 15,5; sector 2-3 B/D = 8,8; 8,7, sección muy irregular.

Coeficiente de Manning calculado: Sector 1-2 $n = 0,0562$ $n = 0,0777$
Sector 2-3 $n = 0,0875$ $n = 0,0953$
Rugosidad calculada: Sector 1-2 $K = 0,317$ m $K = 0,324$ m
Sector 2-3 $K = 0,486$ m $K = 0,425$ m

La rugosidad calculada para cada sector da valores similares para las dos avenidas, pero muy diferentes para los dos sectores. Debido al estrechamiento del canal hay pérdidas locales de energía que generan un incremento aparente de la rugosidad, además las piedras de la parte más estrecha del canal pueden ser de mayor tamaño. La rugosidad calculada corresponde a las rocas existentes en el canal.

11. Río Columbia en Vernita, Washington, U.S.A.

Fecha de la avenida: Mayo 22, 1949
Area de drenaje: 232.000 km²
Caudal máximo: 11.500 m³/s
Coeficiente de Manning estimado: $n = 0,024$
Descripción del canal: Fondo formado por cantos rodados y cascajo cubierto con limo. Los taludes están formados por cantos rodados cementados y cascajo. Relación ancho profundidad B/D = 62,0. Sección regular aproximadamente parabólica.

Coeficiente de Manning calculado: $n = 0,0228$
Rugosidad calculada: $K = 0,142$ m

El valor de la rugosidad calculada corresponde bastante bien con el tipo de material que forma el fondo y los taludes del canal. La avenida estudiada es similar a una gran avenida del río Magdalena en Barranquilla.

12. Río Merced en Happy Isles Bridge, cerca de Yosemite, California.

Fecha de la avenida: Mayo 17, 1950
Area de drenaje: 469 km²
Caudal máximo: 55,2 m³/s
Coeficiente de Manning estimado: $n = 0,065$
Descripción del canal: Canal muy recto con rocas grandes en el fondo, rocas grandes y árboles en los taludes. Relación ancho profundidad B/D = 16,5. Sección aproximadamente trapezoidal.

Coeficiente de Manning calculado: $n = 0,0678$
Rugosidad calculada: $K = 0,341$ m

La rugosidad calculada corresponde con el material del fondo y taludes del canal.

13. Riachuelo Pond de Lousville, Kentocky, U.S.A.

Fecha de la avenida: Febrero 14, 1950

Area de drenaje: 166 km²

Caudal máximo: 41,9 m³/s

Coefficiente de

Manning estimado: $n = 0,070$

Descripción del canal: Fondo en arena fina y limo.

Taludes irregulares con desarrollo denso de árboles de 5 a 20 cm. Estrechamiento grande del canal en la parte central del sector medio por la existencia de un puente. Relación B/D = 14,8, en el puente B/D = 4,6. Sección aproximadamente triangular, irregular.

Coefficiente de

Manning calculado: $n = 0,0760$

Rugosidad calculada: $K = 0,593$ m

La rugosidad calculada da un valor muy alto, parte debido al efecto de la vegetación en los taludes, pero principalmente debido a las pérdidas locales de energía generadas por la fuerte contracción del flujo antes del puente y la expansión posterior.

Los canales Nos. 3, 5, 6, 7 y 11 tienen fondo de cascajo pero unos con árboles en los taludes y otros con cantos rodados. Cuando el efecto del cascajo es predominante la rugosidad absoluta es aproximadamente 0,13 m, cuando influyen elementos mayores o árboles, este valor aumenta.

Los canales Nos. 6, 9, 10, 12 tienen rocas angulares, presentan rugosidades muy similares, con valor promedio 0,32 m.

Para los canales Nos. 4, 8 y 9 se presenta el tamaño medio de las rocas y la rugosidad calculada, la relación de estos valores es: $k/d = 0,56; 0,64; 0,44$, promedio 0,55. Esto indica que como una aproximación puede estimarse la rugosidad como 0,55 del tamaño medio de las rocas, pero un mejor estimativo se consigue midiendo la altura que las rocas sobresalen del fondo del canal.

4. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Con base en las ecuaciones presentadas en el numeral 2, y la información de campo de 18 aforos efectuados por el U.S. Geological Survey a 13 ríos de los Estados Unidos, se calcularon el coeficiente de Manning n y la rugosidad k para los canales estudiados.

Los coeficientes de Manning calculados son muy cercanos a los valores estimados para estos canales por los ingenieros del Geological Survey.

Las rugosidades calculadas concuerdan muy bien con la descripción del canal e información fotográfica presentada por el Geological Survey.

Los caudales estudiados variaron entre 1,8 y 11.500 m³/s y en ningún caso la rugosidad calculada discrepó con la información fotográfica y descripción del canal.

Estas conclusiones muestran que las ecuaciones (3) y (4) obtenidas experimentalmente en un canal de laboratorio con rugosidad homogénea, son aplicables a canales naturales con rugosidad heterogénea de cualquier tamaño y forma.

RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Canal N°	1	2	3	4	5	6	
Tamaño rocas				0,150			
Rugos. calculada	0,079	0,122	0,107	0,084	0,150	0,334	
Material del canal	arcilla	arena	cascajo	canto rodado	cascajo árboles	cascajo rocas	
Canal N°	7	8	9	10	11	12	13
Tamaño rocas		0,305	0,610				
Rugos. calculada	0,229	0,194	0,270	0,320	0,142	0,341	0,593
Material del canal	cascajo árboles	rocas lisas	rocas angulares	rocas angulares	cascajo canto rod.	rocas angulares	limo árboles puente

Tanto las medidas en canales de laboratorio como en canales naturales muestran que el coeficiente de Manning n , varía dentro de rangos muy amplios para un canal al variar la profundidad del agua, principalmente cuando la rugosidad es alta. Esta circunstancia agregada a la gran dificultad que implica estimar un valor de n para un determinado problema, muestran que es inadecuado utilizar la ecuación de Manning para calcular el flujo uniforme en canales de media y alta rugosidad. En canales de baja rugosidad n varía dentro de rangos muy pequeños y la ecuación de Manning es adecuada siempre que se haga un estimativo correcto del coeficiente

n . Pero en todos los casos es más fácil medir o estimar la rugosidad del canal y aplicar la ecuación de Chezy con el coeficiente C variable presentado en el numeral 2. Dadas las formas logarítmicas y exponencial de las ecuaciones (3) y (4) los errores cometidos en la estimación o medida de la rugosidad se amortiguan notoriamente.

REFERENCIAS

Hidráulica de Canales Abiertos, por Richard H. French, McGraw-Hill 1988.

Open-Channel Hydraulics, por Ven Te Chow, McGraw-Hill 1959.