

Influencia del método de estimación en el coeficiente de Manning para cauces naturales

MSc. Carlos Javier Fernández de Córdova Webster e-mail: jfernand@uazuay.edu.ec
Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca. Universidad del Azuay. Cuenca. Ecuador.

Dr. Alcides J. F. León Méndez e-mail: aleonm@cih.cujae.edu.cu
Dra. Yakelín Rodríguez López e-mail: yake@cih.cujae.edu.cu
Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH),
Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría (Cujae). La Habana. Cuba.

Paul Geovanny Martínez Ramírez e-mail: ua066330@uazuay.edu.ec
Diego Martín Meneses Meneses e-mail: ua065379@uazuay.edu.ec
Universidad del Azuay. Cuenca. Ecuador.

RESUMEN

La n de Manning es una de las formas de expresar la cantidad de resistencia al movimiento del agua en cauces, naturales o artificiales. Este coeficiente de resistencia al flujo es muy variable porque depende de una serie de factores como la vegetación, irregularidad, obstrucciones, nivel, caudal, régimen de circulación, entre otros. En el presente trabajo se calcula y se estima la n de Manning, empleando diferentes métodos que aparecen en la literatura, aplicando cada uno en una sección transversal del río Yanuncay en la ciudad de Cuenca, Ecuador. Al final se realiza un análisis de los valores obtenidos y se concluye sobre los mismos.

Palabras clave: cauces naturales, cauces artificiales, caudal, coeficiente de Manning, río Yanuncay.

Influence of the estimation method on Manning coefficient in natural channels

ABSTRACT

Manning's n is one of the ways to express the amount of resistance to water movement in natural or artificial channels. This coefficient of resistance to flow is very variable because it depends on a series of factors such as vegetation, irregularity, obstructions, level, discharge, flow regime, among others. In the present work Manning's n is calculated and estimated using different methods that appear in the literature, applying each one in a cross section of the river Yanuncay in the city of Cuenca, Ecuador. At the end, an analysis of the obtained values is made and conclusions are given about them.

Keywords: natural channels, artificial channels, flow, Manning coefficient, Yanuncay river.

INTRODUCCIÓN

En hidráulica uno de los métodos más utilizados para determinar el volumen que circula por un cauce por unidad de tiempo o caudal es la ecuación de Manning, que depende de parámetros como: área, perímetro mojado, radio hidráulico o la pendiente que son de fácil determinación, no así el coeficiente que refleja la cantidad de resistencia dinámica al flujo, la llamada universalmente n de Manning (Ventura et al. 2011).

La modelación hidráulica como una herramienta que permite representar de una manera simplificada el complejo funcionamiento de la naturaleza, aplica los conceptos de la mecánica de fluidos para elaborar el modelo y verificar si los resultados se ajustan a la realidad antes de construir cualquier estructura hidráulica. La n de Manning es uno de los parámetros más importantes y necesarios en cualquier modelo hidráulico, por lo tanto este valor debe ser determinado adecuadamente para obtener resultados satisfactorios. Un error del 10% en la n implica un error similar en la velocidad o gasto (León y Martínez 2013).

El valor de n en la fórmula de Manning, en numerosos casos, se vuelve subjetivo y depende de la experiencia del proyectista; en el trabajo de Burnham y Davis (1990) se exponen los resultados de un interesante estudio, en el cual se realizó una encuesta a 80 profesionales de la hidráulica, a quienes se les pidió que asignaran un valor de n a 10 diferentes tramos. Los resultados obtenidos demostraron la gran variabilidad que puede tener este parámetro; en el mejor de los casos el 54 % de los profesionales recomendaron una n entre 0,01 y 0,02 mientras que el 46 % restante entre 0,02 y 0,03, con una media de 0,020 y una desviación estándar de 0,005; en el caso de mayor dispersión (desviación estándar de 0,022 y media de 0,062), los valores de n propuestos por los expertos para el mismo tramo estuvieron entre 0,01 y 0,1.

La n de Manning es muy variable y depende de una serie de factores (Chow 1959): rugosidad del perímetro mojado del cauce, vegetación, irregularidad, alineamiento, sedimentación y socavación, obstrucción, nivel y caudal, cambio estacional.

En cauces artificiales varios de los factores que afectan al coeficiente de resistencia al flujo pueden ser disminuidos o eliminados y en general se podría decir que la variabilidad de la n de Manning está mucho más controlada que en un cauce natural.

En cauces naturales existe un cauce principal, que conduce el agua de los caudales bajos y medios, y llanuras de inundación, por donde circulará el agua de los caudales máximos, y cada uno de estos elementos presenta distinta composición de materiales, vegetación, irregularidad, obstáculos, por lo que la resistencia al flujo y la n son diferentes. En este sentido la estimación de este parámetro en cauces naturales se torna más compleja y requiere de mayor cuidado.

El nivel y caudal que circula por un cauce es un factor importante que afecta al coeficiente de rugosidad y por lo tanto merece un análisis particular. Cuando el flujo del agua circula por el cauce principal, a medida que aumenta el caudal o nivel la n de Manning tiende a disminuir, sin embargo, hay que considerar la sección completa del cauce, porque si el caudal es tan grande que alcanza las llanuras de inundación y la vegetación o irregularidad en la misma es considerable, la n de Manning puede aumentar, por lo tanto es indispensable analizar el efecto del nivel o caudal en conjunto con toda la sección compuesta del cauce.

Como se mencionó anteriormente en muchos cauces, aún en los artificiales, la rugosidad varía a lo largo del perímetro. A esto se le suma que para cuantificar certeramente la resistencia dinámica del cauce y las llanuras de inundación al paso de una corriente de agua, hay que considerar el cambio del valor de n como función del régimen de circulación ya que en cada uno de los tres casos posibles (permanente uniforme, permanente variado e impermanente variado) las profundidades y velocidades en cada sección son diferentes, cambiando así la resistencia del cauce al paso de la corriente de agua.

En el caso del régimen permanente y uniforme, que solo se presenta en cauces artificiales, la literatura expone varias formas de calcular la rugosidad compuesta, en función de las características hidráulicas como el perímetro mojado, el área o el radio hidráulico y así encontrar un valor equivalente con el cual evaluar las ecuaciones correspondientes a este régimen de circulación que es función de la profundidad de circulación.

En el régimen permanente y variado, que igualmente se presenta en conducciones artificiales y en naturales, el valor de n cambia como función de la profundidad, la velocidad y las características de la sección en la cual se está evaluando y para un mismo perfil de flujo (curva superficial) los valores reales de la n pueden tener grandes variaciones entre una y otra sección debido no solo al cambio de la profundidad y a la velocidad de flujo, sino también a las características del material que recubre el perímetro mojado.

Esto trae como consecuencia que la determinación de la n debe realizarse espacialmente, sobre todo en cauces naturales donde la variabilidad de los materiales que componen el cauce y las llanuras cambia frecuentemente.

En el régimen impermanente y variado el cambio de la n se produce de forma similar al permanente variado, pero ahora la variable tiempo tiene un papel protagónico y el efecto del tránsito de las ondas de flujo, cada una de ellas con características propias de profundidad y velocidad, repercute, a veces significativamente, sobre los valores de la variable n que se necesita para simular acertadamente en tránsito.

La n de Manning debe ser entendida como un coeficiente de resistencia dinámica del cauce. Si no hay flujo no habrá resistencia y en la medida que el flujo se incremente y por tanto los niveles crezcan, los valores de resistencia se irán manifestando con diferentes magnitudes.

En el caso de grandes avenidas, donde las velocidades de circulación del agua son considerables y el flujo puede alcanzar las llanuras de inundación, la correcta estimación de la n de Manning es de suma importancia, pues como se mencionó anteriormente un error en este parámetro refleja igual error en la velocidad y caudal, lo que supone un riesgo muy grande hacia la población y bienes materiales asentados en la zona.

En este trabajo se analiza la variabilidad de la n de Manning como resultado de la aplicación de algunos de los métodos empíricos más conocidos y tomando para su cálculo una base de datos de velocidad levantados hasta el momento en un tramo del río Yanuncay ubicado en la provincia de Cuenca, Ecuador, con el objetivo de aplicar el método basado en suponer una distribución logarítmica de velocidades para el cálculo de n (León y Martínez 2013).

MÉTODOS DE CÁLCULO DE LA n DE MANNING EN CAUCES NATURALES

En la literatura existen varios métodos para calcular la n de Manning, que consideran algunos o varios de los factores que afectan al coeficiente de resistencia al flujo; hay métodos que se basan en tablas elaboradas por experiencias profesionales, otros en la velocidad del agua medida a profundidades específicas, también se puede calcular la n de Manning aplicando fórmulas empíricas o mediante una comparación de los tramos de interés con fotografías de ríos de otras regiones (Fernández de Córdova et al. 2016).

A continuación se detallan los principales métodos para estimar la n de Manning, citados por León y Martínez (2013):

a) Método de Cowan

Este autor desarrolló un procedimiento para estimar el valor de n en función de algunos parámetros característicos del cauce, aplicando la siguiente fórmula:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5 \quad (1)$$

Los valores de n y m se obtienen de una tabla en función del material del perímetro, irregularidad, variación de la sección transversal, efecto de las obstrucciones, vegetación y curvaturas en planta.

b) Método del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (S.C.S.)

Este método propuesto por el ex – Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (S.C.S.), hoy renombrado como Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (N.R.C.S.), es similar al método de Cowan, se basa en la misma tabla y se calcula con la fórmula:

$$n = (n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5) \quad (2)$$

En esta fórmula se consideran las siguientes equivalencias de la tabla para Cowan: $n_1=n_0$, $n_2=n_4$, $n_3=n_1$, $n_4=n_3$ y n_5 : modificación por la alineación tomando en cuenta las longitudes de curvas (lc) y de tramos rectos (lr) en el cauce, si (lc/lr) está entre 1,0 y 1,2, $m_5=0,00$, si (lc/lr) está entre 1,2 y 1,5, $m_5=0,15$, si (lc/lr) es mayor que 1,5 entonces $m_5=0,30$.

$$n_5 = (n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5 \quad (3)$$

c) Método de la medición de la velocidad

Este método es aplicable a flujos turbulentos e hidráulicamente rugosos con una distribución de velocidades logarítmica, permite obtener el coeficiente de resistencia a través de la velocidad medida a diferentes profundidades, aplicando la siguiente ecuación:

$$n = \frac{(X - 1) * d^{\frac{1}{6}}}{5,57 * (X + 0,95)} \quad (4)$$

donde: d : es la profundidad total del flujo en la sección considerada en metros,

$X=V_{0,2}/V_{0,8}$: es la relación entre las velocidades del flujo, $V_{0,2}$ es la velocidad a 0,2 d de profundidad a partir de la superficie del agua (a 0,8 d desde el fondo), $V_{0,8}$ es la velocidad a 0,8 d de profundidad a partir de la superficie del agua (a 0,2 d desde el fondo).

d) Fórmulas empíricas

Existen varias fórmulas empíricas que permiten determinar el valor de la n de Manning tomando en cuenta el diámetro de las partículas del material que compone el cauce, cada autor utiliza un diámetro diferente para el cálculo del coeficiente de rugosidad, d_{90} , d_{84} , d_{65} , d_{50} , por lo que los resultados pueden ser bastante dispersos.

- Meyer-Peter y Muller (1948): Esta fórmula se aplica para materiales no cohesivos de partículas predominantemente gruesas.

$$n = 0,038 * d_{090}^{\frac{1}{6}} \quad (5)$$

donde: d_{090} es el diámetro (m) del material del lecho, tal que el 90 % en peso es menor.

- Limerinos (1970):

$$n = \frac{0,1129 * R^{\frac{1}{6}}}{1,16 + 2 \log(R/d_{84})} \quad (6)$$

donde: R es radio hidráulico (m) ($0,3 \leq R \leq 1,83$) y d_{84} es el diámetro del material (m) que iguala o excede el 84 % de las partículas ($1,5 \text{ mm} \leq d_{84} \leq 250 \text{ mm}$).

- Simons y Senturk (1976):

$$n = 0,047 * d_0^{\frac{1}{6}} \quad (7)$$

donde: d_0 es el diámetro (mm) de arena, uniformemente seleccionada y ubicada en los lados y fondos del canal.

- Raudkin (1976): para arena.

$$n = 0,042 * d_0^{\frac{1}{6}} \quad (8)$$

donde: d_0 es el diámetro (m) de arena

$$n = 0,013 * d_{065}^{\frac{1}{6}} \quad (9)$$

donde: d_{065} es el diámetro del material del lecho (mm), tal que el 65 % del material en peso es menor.

- Garde y Raju (1976); Subramanya (1982) para arena.

$$n = 0,047 * d_{050}^{\frac{1}{6}} \quad (10)$$

donde: d_{050} es el diámetro del material del lecho (m), tal que el 50 % en peso es menor.

- Blalock y Sturm (1981) plantean calcular el factor n de la ecuación de Manning dividiendo la sección transversal, característica del tramo en estudio, en subsecciones

siempre y cuando las paredes se comporten como hidráulicamente rugosas. Las subsecciones se separan con planos verticales y normalmente se toma una para el cauce y las demás para cada llanura de inundación. Los autores demuestran con esta ecuación cómo aumenta el valor de la rugosidad al disminuir la profundidad.

$$n_i = \frac{R_i^{\frac{1}{6}}}{\sqrt{8g} * C_N * \log(C_G * R_i/k_i)} \quad (11)$$

donde: i : identificador de la subsección

k_i : rugosidad equivalente de las paredes

R_i : radio hidráulico

C_G : coeficiente que depende de la geometría de cada subsección

C_N : coeficiente de Nikuradse que usualmente se toma igual a 2

- Jarret (1984)

$$n = 0,39 * S_f^{0.38} * R^{-0.16} \quad (12)$$

donde: S_f : es la pendiente de la rasante friccional

R : radio hidráulico (m)

Esta ecuación es aplicable para cauces estables de material friccional, en corrientes sin sedimentos, para $(0,002 < S_f < 0,04)$ y $(0,15 < R < 2,1)$.

- HEC RAS (2016)

Esta fórmula depende de un parámetro muy utilizado en el diseño hidráulico de canales, como es la rugosidad absoluta k . La rugosidad está en directa relación con el tamaño de las partículas y utilizar la misma para el cálculo de la n tiene la ventaja de reflejar la variación del factor de fricción en cada instante.

$$n = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{18 * \log(12,2 R/k)} \quad (13)$$

donde: R es el radio hidráulico (m)

y k es la rugosidad (m).

e) Método basado en fotografías

Este método consiste en comparar la zona de estudio con descripciones y fotografías representativas de otros cauces en donde se han calculado sus respectivos coeficientes de rugosidad. Una de las primeras sesiones de fotografía, y la descripción de cada una de ellas, que aparece en la literatura cuantificando la n de Manning en cauces naturales y artificiales, es la publicada por Chow (1959). Posteriormente el U.S. Geological Survey (Ligett y Caughey 1998) estudió una serie de ríos y calculó la n de Manning para cada uno de ellos, midiendo el caudal, los perfiles de agua y sus características.

ESTIMACION DE LA n DE MANNING EN UN TRAMO DEL RIO YANUNCAY EN LA CIUDAD DE CUENCA, ECUADOR

En este trabajo se aplicarán varios de los métodos y fórmulas expuestas anteriormente para calcular la n de Manning en un tramo del río Yanuncay, en Cuenca, Ecuador. Estos resultados son un primer avance en la búsqueda de este importante factor para caracterizar los diferentes tramos de este río.

La ciudad de Cuenca, que tiene 505 585 habitantes según el último Censo de Población y Vivienda realizado por el Instituto Ecuatoriano de Estadísticas y Censos en el año 2010, está ubicada en la provincia del Azuay al sur del Ecuador; geográficamente se encuentra entre las coordenadas $2^{\circ} 39'$ a $3^{\circ} 00'$ de latitud sur y $78^{\circ} 54'$ a $79^{\circ} 26'$ de longitud oeste (Universidad de Cuenca 2013).

La zona urbana se encuentra a una altitud de 2560 m.s.n.m. aproximadamente, y está atravesada por varios ríos y quebradas, siendo los más importantes el Tomebamba, Yanuncay, Machángara y Tarqui (figura 1) (Fernández de Córdova y Rodríguez 2016). La estación de Barabón se encuentra ubicada en la cuenca del río Yanuncay en las coordenadas $2^{\circ} 54'$ de latitud sur y $79^{\circ} 4'$ de longitud oeste; como se puede apreciar en la figura 2 se trata de un tramo de río de montaña con fuerte pendiente y lecho macro rugoso (Aguirre 1998).



Figura 1. Ubicación de la estación de Barabón y la cuenca del río Yanuncay



Figura 2. Lecho del río en la estación de Barabón

a) Método de Cowan

Para n_0 que es la n básica en función del material se tomó el valor correspondiente a grava gruesa igual a 0,028; el n_1 que representa el grado de irregularidad se consideró como suave y le corresponde un valor de 0,000; el efecto de las obstrucciones se valoró como menor por lo que n_3 es igual a 0,010; el n_4 sería igual a 0,005 que refleja una influencia baja de la vegetación y el efecto de las curvaturas se consideró como menor por lo que m_5 es 1,000. Con estos valores de los coeficientes se obtiene un n de 0,043.

b) Método del ex- Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (S.C.S.)

Este método se basa en la misma tabla de Cowan: $n_1=0,028$; $n_2=0,000$; $n_3=0,005$; $n_4=0,010$; $m_5=0,000$; $n_5=0,000$, con lo que n también es igual a 0,043.

c) Método de la medición de la velocidad

En primer lugar se midió la velocidad del río en diferentes verticales de la sección y a profundidades correspondientes a 0,2 y 0,8 de la altura total del agua, medidas desde la superficie libre. Se realizaron dos mediciones: una el 23 de abril de 2016 y otra el 26 de mayo de 2016, ambos aforos se hicieron desde un puente utilizando un molinete de copas múltiples USGS Tipo AAMod.6200, con un rango de medición de velocidades entre 0,025 y 7,6 m/s (figura 3).

Aplicando la fórmula (4) se obtuvo lo que se muestra en la tabla 1 y tabla 2, en la última columna de ambas tablas se descartaron los valores de n que estaban fuera del rango delimitado por el promedio más y menos una desviación estándar. Aplicando el criterio de intervalo de confianza a base de la distribución t-Student con un nivel de confianza del 90% (nivel de significación $\alpha=10\%$), se obtienen los mismos resultados.



Figura 3. Aforo en la estación de Barabón con molinete de copas múltiples

Tabla 1. Cálculo de la n de Manning por el método de la medición de la velocidad

	Profundidad			Velocidades		Fecha: 23 Abril 2016		
Abscisa (m)	Total (m)	0,8h (m)	0,2h (m)	V _{0,8} (m/s)	V _{0,2} (m/s)	X	n	n*
3,05	0,72	0,576	0,144	0,718	1,210	1,685	0,044	0,044
5,05	0,65	0,520	0,130	0,609	1,170	1,921	0,054	0,054
7,05	0,50	0,400	0,100	0,907	1,040	1,147	0,011	
9,05	0,62	0,496	0,124	0,569	1,160	2,039	0,058	
11,05	0,69	0,552	0,138	0,832	1,190	1,430	0,031	0,031
13,05	0,71	0,568	0,142	0,545	0,891	1,635	0,042	0,042
Promedio =	0,67				n Promedio =		0,040	0,042
Desv. Est. =	0,08				Desviación Estándar =		0,017	0,010
					n Promedio ± Desv. Estándar =		0,057	0,023
				Intervalo de confianza del 90%		0,055	0,025	

Tabla 2. Cálculo de la n de Manning por el método de la medición de la velocidad

	Profundidad			Velocidades		Fecha: 26 Mayo 2016		
Abscisa (m)	Total (m)	0,8h (m)	0,2h (m)	V _{0,8} (m/s)	V _{0,2} (m/s)	X	n	n*
0	0,79	0,632	0,158	0,815	1,340	1,644	0,043	0,043
2	0,85	0,680	0,170	1,110	1,680	1,514	0,036	0,036
4	0,62	0,496	0,124	1,160	1,830	1,578	0,038	0,038
8	0,68	0,544	0,136	1,065	2,250	2,113	0,061	
10	0,69	0,552	0,138	1,320	1,460	1,106	0,009	
12	0,79	0,632	0,158	0,534	1,030	1,929	0,056	0,056
Promedio =	0,71				n Promedio =		0,040	0,043
Desv. Est. =	0,11				Desviación Estándar =		0,018	0,009
					n Promedio ± Desv. Estándar =		0,059	0,022
		Intervalo de confianza del 90%		0,056	0,024			

d) Fórmulas empíricas

- Jarret:

Primero se obtuvo la pendiente de la rasante friccional $S_f=0,020$ m/m, que está dentro del rango de aplicación de esta fórmula $0,002 < S_f < 0,04$, luego se calculó el radio hidráulico $R=0,522$ m que también está dentro del rango $0,15 < R < 2,1$, el área y perímetro mojado para obtener el radio hidráulico se calcularon con una altura de flujo igual a 0,80 m, valor cercano al nivel del agua cuando se midieron las velocidades con el método de molinetes. Con estos datos la n de Manning es igual a 0,111.

Para aplicar las siguientes fórmulas previamente fue necesario medir el tamaño de las piedras que componen el lecho del río en esa estación, para lo cual se realizaron varias fotografías a lo ancho de toda la sección cuando la profundidad del agua fue lo suficientemente baja que permitió observar la mayoría de piedras. Para realizar las fotografías se empleó una cámara réflex digital de un solo lente Nikon D5200 de 24,1 megapixels. Luego se unieron las imágenes y se procedió a medir el tamaño de las piedras con la ayuda de Autocad (figura 4).

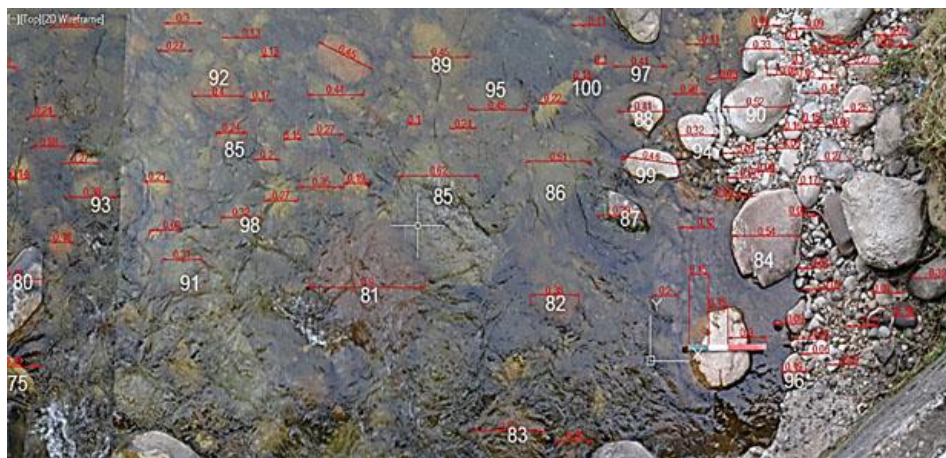


Figura 4. Medición del tamaño de las piedras en la estación de Barabón

De esta forma se obtuvieron los diferentes diámetros necesarios para aplicar las fórmulas para calcular la n de Manning: $d_{90}= 0,72$ m, $d_{84}= 0,63$ m, $d_{50}= 0,41$ m. También se realizó el levantamiento topográfico de la sección de la estación de Barabón para poder calcular el área y perímetro mojado (figura 5).

- Meyer-Peter y Muller (1948): es de aclarar que la fórmula propuesta por este autor no depende del radio hidráulico por lo tanto el resultado es independiente de la altura del flujo o nivel del agua. $n = 0,036$.
- Limerinos (1970): para esta fórmula y la de HEC RAS es necesario calcular el radio hidráulico por lo que se procedió a variar la altura o nivel del agua para obtener varios valores de n y observar su variación (tabla 3).



Figura 5. Sección de la estación de Barabón

- HEC RAS (2016): esta fórmula requiere de un valor de rugosidad k , el que se adoptó como igual a d_{50} y d_{84} (tabla 3).

Tabla 3. Cálculo de la n de Manning con las fórmulas de Limerinos y HEC RAS

Nivel (m)	A (m ²)	P (m)	R (m)	$n_{\text{Limerinos}}$	$n_{\text{HEC RAS}}$	
				d_{84} (m)	k (m)	
				0,63	0,41	0,63
0,8	8,70	16,66	0,52	0,102	0,042	0,050
1,2	16,23	20,26	0,80	0,079	0,039	0,045
1,6	24,19	21,18	1,14	0,069	0,037	0,042
2,0	32,33	22,09	1,46	0,064	0,036	0,041
2,4	40,69	23,30	1,75	0,061	0,035	0,040

La tabla 3 fue construida a partir de una altura de flujo igual a 0,80 m, valor cercano al nivel del agua cuando se midieron las velocidades con el método de molinetes, aumentando hasta una altura de 2,40 m considerada como la máxima antes del desborde, ya que uno de los objetivos de este trabajo es observar la variación de la n de Manning en caudales altos. Como sucede en la mayoría de las ocasiones, a medida que aumenta la profundidad del agua el efecto de la rugosidad disminuye por lo tanto el valor de la n es menor, también se observa el incremento que sufre el coeficiente de resistencia al variar la rugosidad absoluta adoptando un $k=d_{50}$ y un $k=d_{84}$ en la fórmula del HEC RAS.

e) Método basado en fotografías

A partir de las fotografías que aparecen en el libro de Ligett y Caughey (1998) se presentan las dos figuras siguientes como las más representativas del tramo en estudio. En la figura 6 aparece un cauce natural en Porthill, U.S.A., con piedras que tienen un d_{84} igual a 375 mm con las llanuras pobladas de pequeños arbustos, el caudal medido fue de 109,9 m³/s con una profundidad de 1,85 metros, en este caso la n calculada a partir de las mediciones realizadas por United States Geological Survey (USGS) fue de 0,073.

Por su parte, la figura 7 presenta un cauce natural en Idaho, USA, con piedras que tienen un d_{84} igual a 440 mm y las llanuras pobladas con árboles hasta el borde del cauce. El caudal medido en este caso alcanzó el valor de 356,8 m³/s, con una profundidad de 3,8 metros, para este tramo de río la n calculada por el USGS fue de 0,051.

En el caso del texto Hidráulica de Canales Abiertos (Chow 1959), un clásico de la literatura especializada en el tema, se seleccionaron las fotografías que aparecen en las figuras 8 y 9 que según criterio de los autores son las que más se acercan a las condiciones del tramo estudiado. En la imagen de la figura 8 se describe un cauce con el fondo revestido de cantos rodados, sin mucha arcilla en el lecho y el valor de la n de Manning estimada por el autor fue de 0,028.

De igual forma la figura 9 muestra un lecho que se describe en el texto de referencia que tiene cantos rodados grandes y para este caso el valor de la n estimada por el autor fue de 0,030.

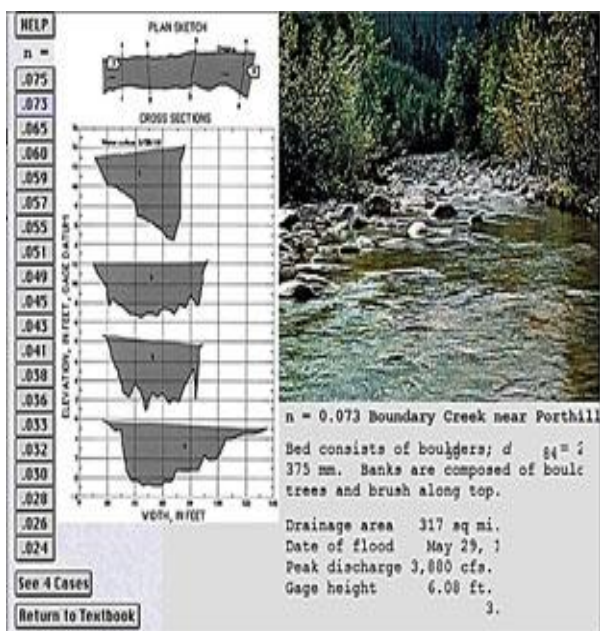


Figura 6. $n=0,073$

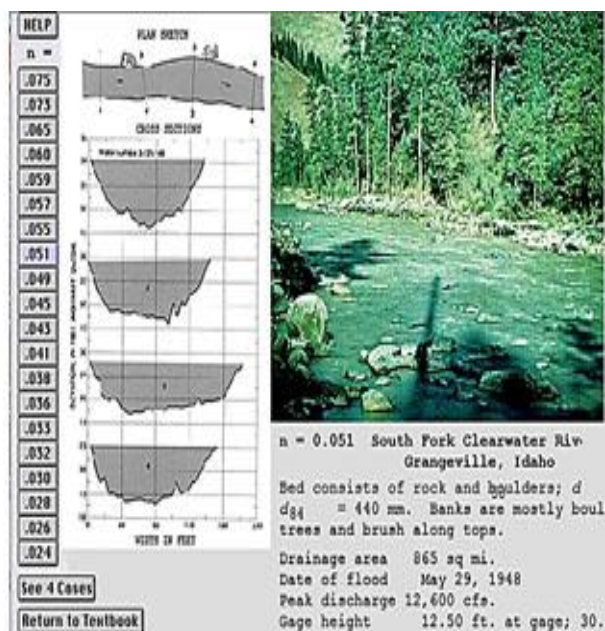


Figura 7. $n=0,051$

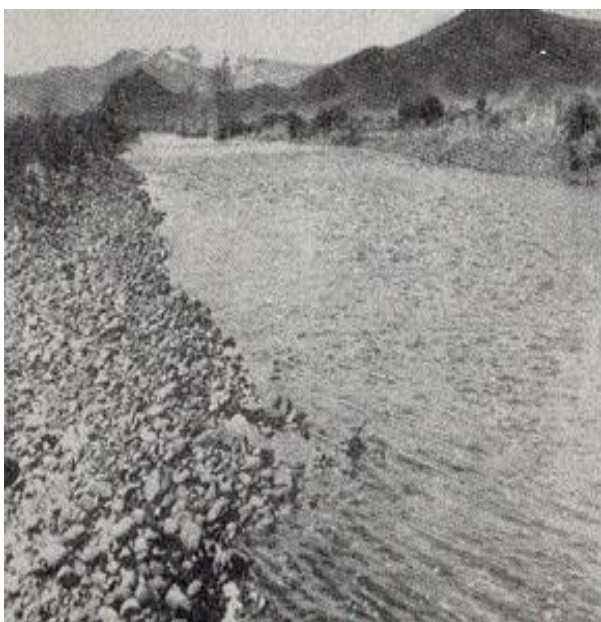


Figura 8. $n=0,028$



Figura 9. $n=0,030$



Figura 10. Estación Barabón, $n=0,036$ según HEC RAS con $k=d_{50}$.

En la figura 10 se aprecia la fotografía del río Yanuncay en la estación de Barabón, el cauce presenta cantos rodados con un diámetro medio de 410 mm y un d_{84} de 630 mm, tomando un k igual al d_{50} y un radio hidráulico igual a 1,46 metros, semejante al valor de las fotografías del USGS, el valor de n obtenido con la fórmula del HEC RAS es de 0,036.

Se evidencia la variación en adoptar un valor por el método basado en fotografías, según el USGS la n estaría entre 0,051 y 0,073, según Chow la n estaría entre 0,028 y 0,030, y cuando se utiliza la fórmula del HEC RAS la n es igual a 0,036.

La diferencia de valores especialmente con las fotografías del USGS puede deberse a la vegetación existente en los ríos de USA ya que el caudal en esos sitios en el instante de cálculo de la n de Manning haría que el agua circulara fuera del cauce principal, en donde los árboles generarían una resistencia al flujo aumentando el valor de la n de Manning. No se puede comparar con respecto a las fotos presentadas por Chow pues el autor no indica la altura de flujo que se consideró para el cálculo de la n .

Lo obtenido para el valor de la n de Manning en estos estudios realizados en la estación del puente Barabón, hasta el momento, aparece resumido en la tabla 4. En la misma se pueden apreciar las diferencias de resultados al aplicar los diferentes métodos que aparecen en la literatura consultada.

En la tabla 4 se observa que el promedio de los valores obtenidos para la n de Manning, sin considerar los calculados con Jarret y Limerinos que están fuera del intervalo considerado como aceptable, es de 0,043; sin embargo al existir una desviación estándar de 0,014 se podría decir que para la estación de Barabón con una altura de flujo cercana a los 0,80 m el valor de la n de Manning estaría entre 0,029 y 0,057.

Tabla 4. Valores de la n de Manning -estación de Barabón del río Yanuncay en Cuenca – Ecuador

Método	n	n^*
Cowan	0,043	0,043
S.C.S	0,043	0,043
Medición de velocidades (23 Abr 2016 y 26 May 2016) profundidad=0,69 m	0,042 y 0,043	0,042 y 0,043
Jarret	0,111	
Meyer-Peter y Muller	0,036	0,036
Limerinos (profundidad del agua = 0,80m)	0,102	
HEC RAS (profundidad del agua = 0,80m)	0,042	0,042
Fotografías del Fluid Mechanics: AnInteractive Text	0,051 a 0,073	0,051 a 0,073
Fotografías del libro de Hidráulica de Canales Abiertos	0,028 a 0,030	0,028 a 0,030
Promedio	0,054	0,043
Desviación Estándar	0,027	0,014
Promedio $\pm$ Desviación Estándar	0,026 a 0,081	
Intervalo de confianza del 90%	0,032 a 0,076	
* En esta columna se colocan los valores de n de Manning que están dentro del intervalo del valor promedio $\pm$ una desviación estándar. También se aplicó el criterio de intervalo de confianza empleando la distribución t-Student con un nivel de confianza del 90% (nivel de significación $\alpha=10\%$), y se obtuvo el mismo resultado.		

CONCLUSIONES

- Como se puede observar son múltiples los factores que afectan al coeficiente de rugosidad y que inciden directamente sobre el cálculo del caudal que circula por un cauce natural, por lo que debería prestarse mucha atención y dedicar una buena parte del tiempo a evaluar cada uno de los factores mencionados anteriormente, lo que permitirá obtener mejores resultados y conocer de mejor manera el funcionamiento hidráulico del tramo a analizar.
- Este trabajo evidencia de forma clara la incertidumbre en la determinación de la n de Manning al aplicar los diferentes métodos y fórmulas que expone la literatura especializada, sin embargo, de un análisis preliminar se podría concluir que el método de las velocidades es el que más se acercaría a un valor real, ya que es menos subjetivo que los otros que basan su cálculo en tablas o fotografías, además considera la variación de la resistencia al flujo tanto en ancho como en profundidad de la sección transversal del río, y si se realizaran varios ensayos con diferentes caudales en la misma sección se tendría en cuenta la variación de la n de Manning como consecuencia del flujo que escurre en la sección estudiada.
- Este trabajo es el inicio del estudio de la n de Manning en el río Yanuncay, pues se replicará la metodología presentada en este artículo en otros dos tramos que son susceptibles a desbordamientos e inundaciones que se estudiarán en un futuro cercano. Además se calcularán los diámetros característicos para aplicar las fórmulas empíricas en

25 secciones a lo largo de 30 kilómetros del río Yanuncay que permitirán obtener resultados más concluyentes en torno a la investigación del coeficiente de rugosidad.

- No obstante lo anterior, la aproximación obtenida en este trabajo permite un acercamiento confiable al importante valor de la n de Manning y a su intervalo de variabilidad.

REFERENCIAS

Aguirre J.(1998). “Flujo de superficie libre en cauces de alta pendiente y gran rugosidad”, Tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias Técnicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.

Burnham M. and Davis D. (1990). “Effects of data errors on computed steady-flow profiles”, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 116, no. 7, p. 914-929, ISSN 0733-9429, American Society of Civil Engineers, USA.

Chow V. T. (1959). “Open Channels Hydraulics”. McGraw-Hill Book Company, Inc; New York, 679 p.

Fernández de Córdova C. y Rodríguez Y. (2016). “Primeros resultados de la red actual de monitoreo hidrometeorológico de Cuenca, Ecuador”, Ingeniería Hidráulica y Ambiental, vol. 37, no. 2, May-Ago 2016, pp. 44–56, ISSN-1815-591X. Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana.

Fernández de Córdova C., León A. y Rodríguez Y. (2016). “Comparación de alternativas para el cálculo de la n de Manning en cauces naturales: caso de estudio estación de Barabón de la cuenca del río Yanuncay en Ecuador”, XVIII Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana.

León A. y Martínez Y. (2013). “Hidráulica de las conducciones libres”, Editorial Poligráfica Félix Varela, ISBN 978-959-07-1867-0, La Habana, Cuba.

Ligett J. A. and Caughey D. A. (1998). “Fluid Mechanics: an interactive text”, American Society of Civil Engineers and the Multimedia Courseware Studio, Cornell University, All Rights Reserved ISBN, USA.

Universidad de Cuenca (2013). “Implementación de la metodología de análisis de vulnerabilidades a nivel cantonal”, Proyecto DIPECHO VII, Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos, Comisión Europea y Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, Cuenca, Ecuador.

Ventura F., Guevara E. y Cartava H. (2011). “Cálculo del coeficiente de rugosidad n de Manning en los grandes ríos de Venezuela”, Revista de Ingeniería, vol. 7, no. 002, ISSN: 1316-6832, Universidad de Carabobo, Venezuela.