

RESUMEN.

La determinación correcta de la resistencia al flujo en canales abiertos con planicie de inundación, es un problema de la Ingeniería Hidráulica ya que, las fórmulas convencionales han sido desarrolladas para trabajar satisfactoriamente para el cálculo de flujos simples, como los que ocurren en canales prismáticos de rugosidades uniformes y esas condiciones rara vez son encontradas en un cauce natural.

En los cursos naturales el cauce se caracteriza por una sección transversal compuesta y una considerable variabilidad de rugosidades a lo largo del perímetro mojado y de las planicies de inundación adyacentes, esto conduce a situaciones de flujo con resistencias adicionales.

En el presente trabajo se analizó el comportamiento del coeficiente de rugosidad de Manning, en un tramo del río Guadalquivir ubicado aproximadamente a la altura de la estación del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), que recibe el nombre de estación de Obrajes, se hizo en este lugar debido a que es la única estación en el valle central de Tarija que cuenta con aforos realizados con un molinete hidráulico y registros de máximas crecidas medidos con un limnógrafo, para un periodo considerable de años.

Con la ayuda de los aforos realizados con el molinete hidráulico se determinó la curva de descarga representativa, con la cual se calculó el caudal de crecidas en función del tirante medido con el limnógrafo; además se realizó un levantamiento topográfico con el cual se determinó primero la pendiente media del cauce, que tiene un valor de 2.3‰ y luego se realizó el levantamiento de tres secciones transversales, la primera aguas arriba de la sección de aforo, la segunda en la sección de aforo mismo y la tercera aguas abajo de la misma, con la ayuda de estas tres secciones se determinó una sección media que se asumió como constante para todo el tramo; en esta sección media se determinó curvas de ajuste del área hidráulica y el perímetro mojado en función del nivel o tirante para después determinar estos parámetros para los caudales de máximas crecidas.

Luego, aplicando el método inverso de la ecuación de Manning se determinó con los caudales aforados con el molinete hidráulico, los coeficientes de rugosidad del material lecho del río que se encuentran en el rango de 0.0251 hasta 0.0332, obteniéndose un valor

medio de 0.0292; con los caudales de máximas crecidas de la misma forma se determinó los coeficientes de rugosidad para todo el perfil transversal de la sección es decir, aquella rugosidad que es afectada por la planicie de inundación y por el material del lecho del río, estos valores se encuentran entre 0.0261 y 0.0396, obteniéndose un valor promedio de 0.0328; teniendo ya estos valores se aplicó a la inversa el criterio de la rugosidad ponderada propuesto por Horton y Einstein para determinar el coeficiente de rugosidad de la planicie de inundación el cual se encuentra entre el rango de 0.0223 hasta 0.0450, determinándose un valor promedio de 0.336.

Para todos los valores de la rugosidad, se analizó su correlación con el caudal determinándose que, las rugosidades calculadas en función del caudal aforado con el molinete hidráulico decrecen en su valor a medida que aumenta el caudal, observándose una disminución de la resistencia al flujo; en las rugosidades determinadas para la planicie de inundación se observa un comportamiento inverso a las rugosidades del material del lecho del río ya que, a medida que aumenta el tirante y por ende el caudal, la rugosidad también lo hace sistemáticamente debido a que cada vez abarca mayor planicie de inundación.

Como una comprobación se aplico los valores determinados por el método inverso, separando los caudales que circulan por el lecho del río y por la planicie de inundación, determinando independientemente el caudal en cada una de estas secciones con sus respectivas rugosidades; también se determinó el caudal para algunos coeficientes de rugosidad mas comunes propuestos en la bibliografía, luego se los comparo en una gráfica con los caudales reales determinados por la curva de descarga en función de los tirantes medidos con el limnígrafo, de esta manera se demostró que separando el flujo que circula por rugosidades diferentes los resultados son mucho mas confiables que considerando una rugosidad constante para todo el perfil del cauce.

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. SELECCIÓN Y DEFINICIÓN DEL TEMA DEL PROYECTO.

Título del Proyecto: “Determinación del Coeficiente de Rugosidad de Manning Aplicando el Método Inverso”.

Se definió trabajar con este tema, porque se observó la gran deficiencia que se genera al momento de seleccionar un valor adecuado del coeficiente de rugosidad al aplicar la ecuación de Manning a los cauces naturales, ya que, esta ecuación ha sido formulada para trabajar con canales prismáticos de rugosidad uniforme y estas condiciones son muy diferentes a las encontradas en un cauce natural.

Por esta razón se plantea este tema con el fin de poder determinar y comprender mejor el comportamiento del coeficiente de rugosidad de Manning en ríos con planicie de inundación, analizando como principales variables el tirante y el caudal que se presentan en un determinado cauce.

Además este trabajo esta dirigido a la contribución en varias ramas de la ingeniería particularmente la ingeniería hidráulica y busca analizar y comprender el comportamiento del coeficiente de rugosidad de Manning en cauces naturales con planicie de inundación, logrando de esta manera generar pautas que con futuras investigaciones logren solucionar la incertidumbre que se genera al momento de seleccionar un valor de “n” de Manning cuando se aplica la ecuación del mismo nombre a corrientes naturales.

1.2. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL PROYECTO.

El desarrollo de este proyecto se llevo a cabo en la ciudad de Tarija-Bolivia más propiamente en la provincia Cercado sobre las aguas del río Guadalquivir perteneciente a la cuenca del Bermejo sub-cuenca del Guadalquivir, a la altura de una estación meteorológica del SENAMHI que recibe el nombre de estación de Obrajes ubicada a $21^{\circ}31'$ latitud Sur y $64^{\circ}46'$ longitud Oeste y a una altitud de 1890 m.s.n.m., la figura 1.2 muestra la ubicación del tramo en estudio en relación ala ciudad de Tarija.

La elección del lugar y el tramo donde se realizó el trabajo estuvo en función de la información que se pudo reunir, ya que en nuestro medio es muy escasa la información de

aforos de caudales y el limitado tiempo con el que se contaba para el desarrollo de este trabajo hacia imposible que el autor realice personalmente los aforos.

Se eligió trabajar a la altura de la estación de Obrajes debido a que es la única estación que cuenta con un registro considerable de información; los datos proporcionados por el SENAMHI se muestran en el anexo I y cuentan con 426 aforos de caudales realizados por el personal de esta institución, los cuales están repartidos en una serie de 43 años desde agosto de 1977 hasta octubre de 2011, lo cual se considera como una muestra admisible para el desarrollo de este trabajo.

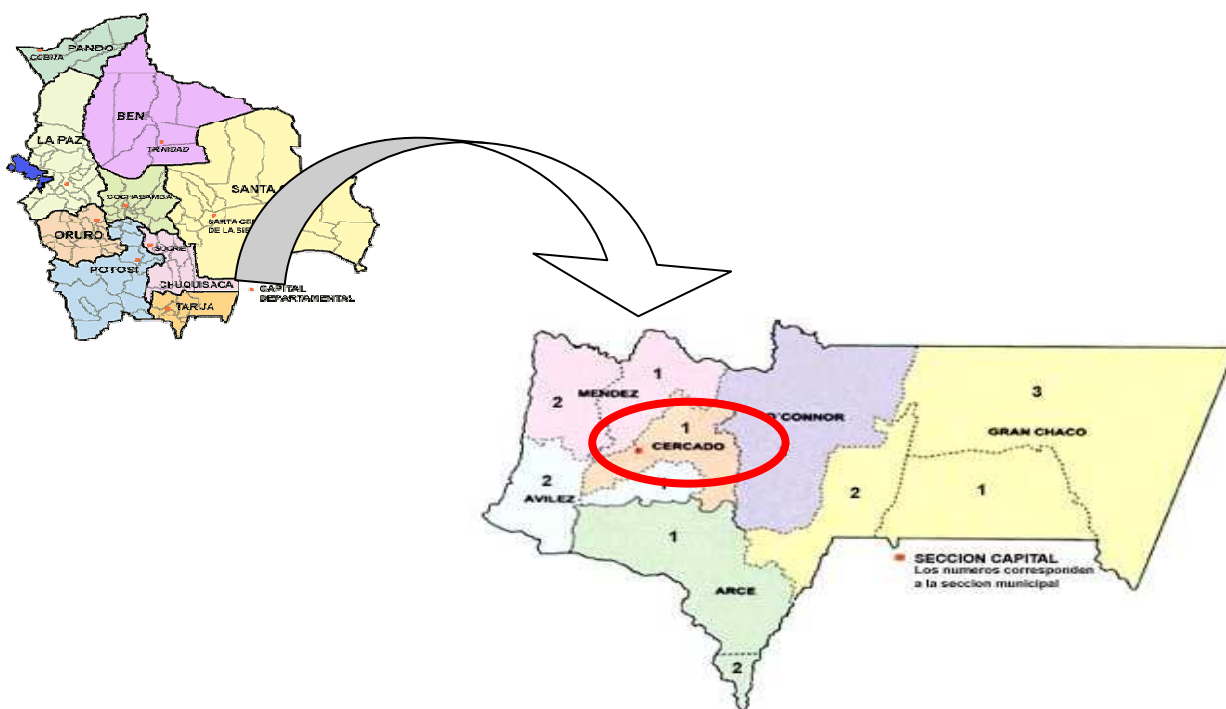


FIGURA 1.1.- Ubicación de la región donde se encuentra el tramo en estudio.

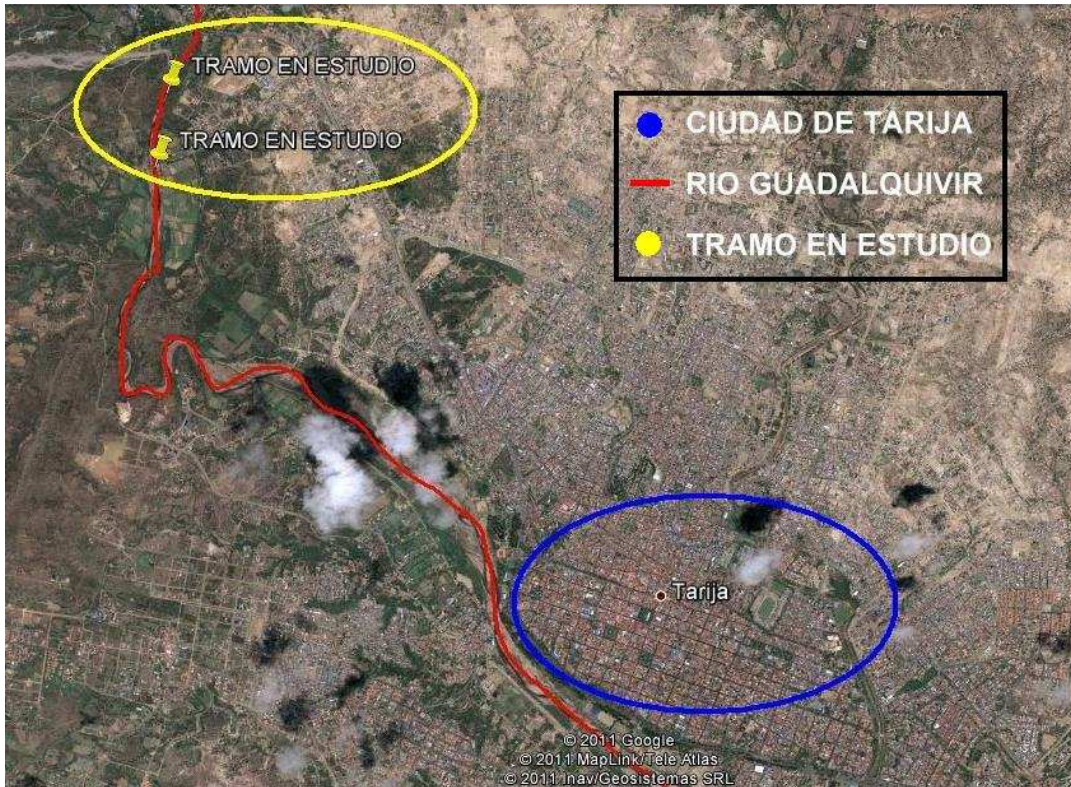


FIGURA 1.2.- Ubicación del tramo en estudio en relación a la ciudad de Tarija.

1.3. EL PROBLEMA.

1.3.1. Planteamiento.

Aplicando la fórmula de Manning, la más grande dificultad reside en la selección o el cálculo del coeficiente de rugosidad, pues no hay un método exacto para seleccionar un valor adecuado de “ n ”, este problema es aún mayor cuando se requiere usar esta ecuación para el cálculo de caudales en cauces naturales ya que, la gran cantidad de factores que afectan a este valor y la influencia no definida de cada uno de estos produce una serie de contradicciones a la hora de confiar en la veracidad de los resultados.

La determinación de la rugosidad de Manning en cauces naturales es un problema de la ingeniería hidráulica, ya que las fórmulas convencionales han sido desarrolladas para trabajar satisfactoriamente en canales prismáticos con taludes de rugosidades uniformes y estas condiciones raramente son calculadas en un cauce natural.

En los cursos naturales, el cauce se caracteriza por una sección transversal compuesta y una considerable variabilidad de rugosidades a lo largo del perímetro mojado y de las planicies de inundación adyacente.

Esto conduce a situaciones de flujo con resistencias adicionales, donde la determinación del coeficiente de rugosidad constituye un aspecto sumamente complejo, razón por la cual, la estimación de la resistencia hidráulica al escurrimiento a partir de las tablas y ábacos que proporciona la bibliografía es aplicable sólo ocasionalmente.

1.3.2. Formulación.

El proyecto: ¿responde a las necesidades de la comunidad, de la ciencia, de la institución, y/o del investigador?

Si, en relación a la comunidad (refiriéndose más que todo a la comunidad de ingenieros civiles) el proyecto se constituye en una alternativa a la necesidad de contar con bases sólidas al momento de realizar la selección de un determinado valor del coeficiente de rugosidad de Manning sobre todo en trabajos donde se aplique esta ecuación a cauces naturales.

En cuanto a la institución (en este caso nuestra Universidad), mediante este proyecto se plasma una de las metas y objetivos fundamentales de la misma, pues se contribuye de manera directa al ejercicio de la profesión de los Ingenieros Civiles, por medio de un proyecto de investigación claro y concreto.

1.3.3. Sistematización.

¿El objetivo, responde a una necesidad real del investigador, proyectista, de la institución y de la sociedad?

Es evidente la necesidad de contar con un criterio técnico y detallado sobre qué valor de coeficiente de rugosidad se debe seleccionar para trabajar en cauces naturales y obtener resultados más confiables, pues la sola experiencia del profesional no es suficiente para justificar la selección de algún valor de este.

En muchos casos la falta de certeza de que un valor sea el adecuado, conlleva a la mala ejecución de la misma y/o a la presencia de fallas posteriores, lo cual no sólo daña a la institución y/ o entidad contratante, sino también afecta la reputación del profesional, al considerar la sociedad que no dispone de la suficiente preparación académica para realizar su trabajo.

1.4. OBJETIVOS.

1.4.1. Objetivo general.

- Determinar el coeficiente de rugosidad de Manning aplicando el método inverso en un tramo del río Guadalquivir a la altura de la estación de Obrajes, para analizar el comportamiento de este coeficiente en ríos con planicie de inundación.

1.4.2. Objetivos específicos.

- Cuantificar el caudal en el tramo sujeto a estudio.
- Análisis del comportamiento de la variable caudal y la rugosidad.
- Establecer la influencia de la planicie de inundación en el coeficiente de rugosidad, cuando se producen las máximas crecidas.
- Comparar los resultados obtenidos por el método inverso con los obtenidos mediante ábacos.

1.5. JUSTIFICACIÓN.

1.5.1. Teórica.

Mediante la elaboración del presente trabajo, se pretende demostrar que el valor de “ n ” de Manning, no es una constante cuando se trabaja en cauces naturales, mas por el contrario, se trata de un valor que es afectado por múltiples factores los cuales interactúan unos con otros modificándose entre si; por ejemplo el valor de “ n ” disminuye cuando el tirante crece y luego aumenta súbitamente cuando el flujo está circulando por la superficie de inundación debido a la influencia de la cobertura vegetal presente en esta.

1.5.2. Metodológica.

El presente trabajo está orientado a determinar gráficas, en las cuales se demuestre el comportamiento del coeficiente de rugosidad de Manning ante algunas variables

principalmente el caudal, además de formular recomendaciones que faciliten el entendimiento de este fenómeno y la selección de este coeficiente.

1.5.3. Práctica.

El autor espera que la exitosa conclusión de este trabajo proporcione una ayuda al momento de seleccionar un valor adecuado para el “n” de Manning cuando se esté aplicando esta ecuación a cauces naturales principalmente en las zonas cercanas al tramo en estudio.

1.6. MARCO DE REFERENCIA.

1.6.1. Teórico.

Determinación de la Rugosidad de Manning mediante el Método Inverso.

Mientras que las ecuaciones de Chezy y Manning son las más empleadas en la ingeniería hidráulica, Myers (1990) cita que la ventaja de usar el factor de Darcy-Weisbach para trabajos científicos reside en que dicho coeficiente es adimensional y permite la comparación con otros experimentos (Martin y Myers, 1991).

La relación entre los tres coeficientes es la siguiente:

$$C = \frac{R^{1/6}}{n} = \sqrt{\frac{8g}{f}} \quad (1.1)$$

Donde “C” es el coeficiente de Chezy ($m^{1/2} s^{-1}$); “n” es el coeficiente de Manning ($s m^{-1/3}$); “f” es el factor de Darcy-Weisbach ().

La ecuación de Manning se escribe como:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \quad (1.2)$$

Donde “S” es la pendiente de la línea de energía.

Para disminuir los errores que pueden provocar las diferencias de flujo, Ceirano y colaboradores, apoyados en una serie de mediciones en el campo, además de dividir el sistema en subcomponentes, separaron el escurrimiento del cauce principal y de la

correspondiente planicie de inundación, bajo la hipótesis de que existe el mismo nivel de agua en ambos y por lo tanto no hay pendiente transversal. Teniendo en cuenta lo anterior el caudal total Q_t se puede expresar como:

$$Q_t = Q_p + Q_i \quad (1.3)$$

El problema directo consiste en que “n” es un parámetro de ajuste, Sf, A y R son datos y la incógnita es el Q.

El problema inverso es que el caudal es dato y la incógnita es el coeficiente de rugosidad de Manning y describiendo la ecuación para el cauce principal y la planicie de inundación obtenemos las siguientes expresiones:

$$n_p = \frac{1}{Q_p} A_p R_p^{2/3} S_p^{1/2} \quad (1.4)$$

$$n_i = \frac{1}{Q_i} A_i R_i^{2/3} S_i^{1/2} \quad (1.5)$$

Donde “ n_p ” y “ n_i ” constituyen las rugosidades de Manning del cauce principal y de la planicie de inundación respectivamente.

1.6.2. Conceptual.

Para el presente trabajo se considera necesario definir los siguientes conceptos:

Coeficiente de Manning: El coeficiente de resistencia o de rugosidad llamado “n” de Manning, se define como el factor de resistencia al escurrimiento que expresa el equilibrio entre las fuerzas de masa y de presión y la resistencia al corte que ofrece la superficie del cauce o la energía que se disipa en el fluido a causa de la turbulencia de la corriente.

Método Empírico: Un método empírico es aquel que es producto del conocimiento empírico y está basado en la experiencia y, en último término, en la percepción, pues nos dice qué es lo que existe y cuáles son sus características, pero no nos dice que algo deba ser necesariamente así y no de otra forma; tampoco nos da verdadera universalidad. Consiste en todo lo que se sabe y que es repetido continuamente sin tener un conocimiento científico.

Cauce Natural: El cauce o lecho fluvial es la parte del fondo de un valle por donde discurren las aguas en su curso: es el confín físico normal de un flujo de agua, siendo sus confines laterales las riberas.

Superficie de Inundación: Se llama así al terreno que normalmente está a los márgenes del cauce natural, por donde circula agua solamente cuando ocurren las máximas crecidas se caracteriza generalmente por la presencia de vegetación.

1.6.3. Espacial

El presente trabajo, tiene una amplia aplicación en la ingeniería hidráulica, pues el uso de la ecuación de Manning es muy común en nuestro medio y se espera que el mismo pueda ser usado como un parámetro de referencia para distintos proyectos en los que se tenga que aplicar dicha ecuación en cauces naturales, además de futuras investigaciones.

1.6.4. Temporal.

El tiempo en el que se analizara el presente trabajo esta en función de la información proporcionada por el SENAMHI, como la muestra disponible esta en el periodo de agosto de 1977 a octubre de 2011, ese rango de 34 años será periodo a considerar para el desarrollo de este trabajo.

1.7.HIPÓTESIS.

1.7.1. De primer grado.

Hipótesis I: De los experimentos y mediciones realizados por una serie de investigadores se deduce que no puede pensarse que el valor de “n” de un cauce natural dependa exclusivamente del material o tipo de suelo que constituye el lecho de este y se mantenga constante para diferentes condiciones de circulación. Entonces la primera hipótesis planteada será que “*n tiene variación en función a factores que interactúan unos con otros modificando su valor inicial*”.

1.7.2. De segundo grado.

Hipótesis II: Por lo general se conoce que, el valor de “n” disminuye al incrementar el tirante y el caudal, a consecuencia de la reducción de la influencia relativa de la rugosidad

en las paredes y el fondo del canal. La segunda hipótesis entonces será que *“en la presencia del incremento del caudal que circula en el canal natural menor será el valor del coeficiente de Manning, y a menor caudal mayor será el valor n”*.

Hipótesis III: Basados en la hipótesis II pero aplicándolo a cauces naturales, se sabe que a medida que aumenta el tirante y al extenderse la circulación por el cauce de avenida, el agua llega a un nivel de inundación, que tiene la característica de ser más rugoso por la presencia de vegetación, haciendo que el valor de “n” vuelva a incrementarse notablemente. La tercera y última hipótesis será entonces que *“el coeficiente de Manning decrece cuando el caudal comienza a aumentar, pero crece súbitamente cuando el caudal llega a la llamada superficie de inundación”*.