UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SOFTWARE DE ACOPLE A HEC-RAS: CÁLCULO DE EJES HIDRÁULICOS EN LECHOS MACRO RUGOSOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

PATRICIO ANTONIO PASTENES ARAOS

PROFESOR GUÍA:
ALBERTO DE LA FUENTE STRANGER

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS
MARCELO OLIVARES ALVEAL

SANTIAGO DE CHILE
JUNIO 2012

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL.
POR: PATRICIO PASTENES A.
FECHA: 20/06/2012.
PROF. GUÍA: Sr. ALBERTO DE LA FUENTE.

"DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SOFTWARE DE ACOPLE A HEC-RAS: CÁLCULO DE EJES HIDRÁULICOS EN LECHOS MACRO RUGOSOS"

En la presente memoria se brinda una herramienta computacional de acople a HEC-RAS, denominada MR-HR, la cual es capaz de resolver escurrimientos sobre lechos tanto rugosos como macro rugosos en cauces naturales, mediante la implementación de diferentes expresiones no lineales que dan cuenta del efecto de la macro rugosidad.

La primera etapa del estudio, consistió en la recopilación de antecedentes generalizados de pérdida de carga en cauces naturales. Posteriormente se recopilaron los antecedentes de pérdida de carga asociados con lechos macro rugosos, particularmente, las parametrizaciones del número de Strickler de Keulgean (1938), Limerinos (1970), Parker y Peterson (1980) y Ayala y Oyarce (1993). Estas expresiones fueron ajustadas para lograr una transición suave entre lechos macro rugosos y rugosos, forzando a que el número de Strickler en lechos rugosos fuera igual a 0.12.

Luego se desarrolló una aplicación en un caso real en un tramo particular del río Baker, de 148 km de extensión, comprendidos entre Baker 1 y la desembocadura en caleta Tortel. Esta aplicación se dividió en dos partes. En la primera, se simplificó el lecho del cauce asumiendo un sólo diámetro característico para todo éste, lo que implicó que la macro rugosidad varió únicamente por el desarrollo del eje hidráulico. En la segunda, se abordó el problema lo más general posible, admitiendo que la macro rugosidad variará tanto en función del desarrollo del eje hidráulico como en función de la variación longitudinal del tamaño de los sedimentos del lecho. El sentido de dividir la aplicación en dos partes fue que en la primera etapa, simplificada, se buscó analizar los factores de los que dependían los ejes hidráulicos proporcionados por las distintas parametrizaciones, y en la segunda etapa, se buscó corroborar lo anterior y comparar los resultados con el eje hidráulico proporcionado por un coeficiente de Manning uniforme para todo el cauce que obvió los efectos de la macro rugosidad.

Los resultados de la primera etapa sugirieron que el desarrollo de ejes hidráulicos considerando las parametrizaciones aquí revisadas, es un problema que carece de generalidad en términos de que no siempre es posible esperar que una parametrización brinde alturas de escurrimiento mayores que las demás. Esto se debe a que aparte de la parametrización seleccionada, el desarrollo del eje hidráulico está influenciado por la distribución espacial de los números de Strickler que a su vez dependen de otros factores como el caudal, la geometría particular del cauce y las condiciones de borde del problema. En la segunda etapa, se corroboraron las hipótesis anteriores para un caudal en particular, y con respecto a la comparación entre considerar un lecho como macro rugoso y no considerarlo, se obtuvieron diferencias significativas dada la comparación desigual realizada.

Finalmente se menciona que los resultados obtenidos son particulares y que por ningún motivo deben extrapolarse a otros problemas sometidos a distintas condiciones, y se proporcionan consideraciones que se deberían tener en cuenta al momento de evaluar los resultados brindados por MR-HR.

A MI HERMANA CAROLINA
A QUIEN AMO

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis agradecimientos a todas las personas que contribuyeron en mi proceso de formación académica, en particular:

- A mi familia y polola por su incesable apoyo a lo largo de toda mi formación.

- A mi profesor guía, Sr. Alberto de la Fuente S., por su dedicación, comprensión, disposición, contribución al desarrollo de este trabajo y su aporte en mi formación académica.

- A los miembros que integran esta comisión y al Sr. Yarko Niño, por sus aportes y sugerencias al desarrollo de este trabajo.

- A CEA limitada, por las facilidades brindadas para poner término a esta memoria.

INDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN 1

1.1 Motivación 1
1.2 Objetivos y Alcances 3
1.2.1 Objetivo Principal 3
1.2.2 Objetivos Específicos 3
1.2.3 Alcances 4
1.3 Contenido del Informe 4

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES 5

2.1 Pérdida de Carga en Lechos Macro Rugosos 5
2.2 Diferencia entre Lechos Rugosos y Macro Rugosos 11
2.3 Parametrizaciones Consideradas 13
2.3.1 Keulegan (1938) 13
2.3.2 Limerinos (1970) 15
2.3.3 Parker y Peterson (1980) 18
2.3.4 Ayala y Oyarce (1993) 20
2.4 Resumen de Parametrizaciones Consideradas 22

CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA: MR-HR 26

3.1 Ajuste de Parametrizaciones 26
3.1.1 Ajuste Lineal 27
3.1.2 Ajuste Parabólico 29
3.1.3 Ajuste Ayala y Oyarce 31
3.1.4 Resumen Coeficientes Lineales y Parabólicos 32
3.1.5 Ajustes Inverso de Rugosidad Relativa Mínimo 35
3.1.6 Resumen de Parametrizaciones Ajustadas 36
3.2 Atributos MR-HR 36
3.3 Relaciones entre MR-HR y HEC-RAS 38
3.4 Esquema de Funcionamiento 40
3.5 Resultados Proporcionados 41

CAPÍTULO 4. APLICACIÓN AL RÍO BAKER. 43

4.1 Antecedentes Generales Río Baker 43
4.2 Tramo Particular Estudiado 46
4.3 Caracterización Granulométrica 47
4.4 Cálculo de Ejes Hidráulicos Mediante MR-HR 55

CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN Y ALCANCES 70

BIBLIOGRAFÍA 72

ANEXO A. MANUAL DE USO MR-HR I

A.1 Generalidades I
A.2 Instalación I
A.3 Requisitos II
A.3.1 Computacionales II
A.3.2 Proyecto Importado desde HEC-RAS III
A.4 Componentes VII
A.4.1 Ventana Principal VIII
A.4.2 Submenú Archivo IX
A.4.3 Submenú Configuración XII
A.4.4 Submenú Ejecutar XVII
A.4.5 Submenú Resultados XVIII
A.4.6 Submenú Ayuda XXIV
A.5 Ejemplo de Cálculo de MR-HR XXVI
A.6 Errores Conocidos XXXII

ANEXO B. ARCHIVOS DIGITALES XXXIII

B.1 MR-HR XXXIII
B.2 Código Fuente MR-HR XXXIII
B.3 Ejemplo Aplicación al Río Baker XXXIV
B.4 Ejemplo de Cálculo Manual de Uso XXXIV
B.5 Resultados Completos Aplicación al Río Baker XXXIV

ANEXO C. HEC-RAS Y VISUAL BASIC EXPRESS 2010 XXXVI

Capítulo 1. Introducción

1.1 Motivación

Este trabajo trata acerca del cálculo de ejes hidráulicos en cauces fluviales con lechos macro rugosos, es decir, lechos con rugosidades relativas, definidas como el cuociente entre el diámetro característico de sedimento grueso y el radio hidráulico, extremadamente altas (superiores a 0.1). Este tipo de lechos son muy habituales en Chile, en particular, en escurrimientos de alta montaña con altas pendientes donde se presentan escurrimientos torrenciales en los cuales el radio hidráulico se hace comprable con el tamaño del sedimento grueso. También se extiende su aplicabilidad a cauces con lechos rugosos, aquellos con rugosidades relativas inferiores a 0.1.

La macro rugosidad se caracteriza por la presencia de grandes partículas de sedimento que generan despegues y estelas en el flujo en torno a éstas. Esto provoca un aumento considerable en el coeficiente de fricción que en este trabajo de titulo es representado por el coeficiente de Manning. El número de Strickler representa un parámetro adimensional que relaciona el coeficiente de Manning con el tamaño de los sedimentos gruesos y el radio hidráulico. Por lo tanto, para conocer el coeficiente de Manning se necesita conocer el número de Strickler y para conocer este último se necesita conocer previamente el radio hidráulico o en forma equivalente el desarrollo del eje hidráulico y algún diámetro característico del sedimento grueso. En cauces naturales, en general, el tamaño de los sedimentos de fondo son variables en función de su desarrollo y además los ejes hidráulicos no son uniformes. Esto produce un problema iterativo que tanto softwares comerciales como no comerciales no han abordado del todo. Por lo que hoy en día el calculista debe realizar las iteraciones en forma manual, lo cual se incrementa en función del número de secciones transversales a las que se vea enfrentado. Esto implica que, en la práctica, el calculista no realice ninguna iteración, proponiendo un valor uniforme para el coeficiente de Manning y adopta como verdadero el valor del eje hidráulico asociado a ese Manning.

Distintos investigadores, entre ellos Keulegan (1938), Limerinos (1970), Parker y Peterson (1980) y Ayala y Oyarce (1993), han analizado este tipo de lechos macro rugoso, y han planteado

distintas relaciones no lineales para el cálculo del número de Strickler, de aquí en adelante llamadas parametrizaciones del número de Strickler, en función del tamaño de las partículas de sedimento grueso y el radio hidráulico.

Para el cálculo de ejes hidráulicos en lechos de granulometrías gruesas existen en general dos enfoques principales. El primero es denominado método de manual, en donde el ingeniero recurre a la literatura y selecciona un coeficiente de Manning tabulado por diversos investigadores o si dispone de granulometría calcula coeficientes de Manning básicos n_0 y luego se modifican para hacerlos representativos del cauce. El segundo enfoque, el cual se aborda en este trabajo de título, trata acerca de la cálculo del coeficiente de Manning mediante un enfoque analítico, el cual utiliza tanto información granulométrica como información del escurrimiento del cauce y se resuelve en base a iteraciones sucesivas considerando el efecto de la macro rugosidad.

Ambos enfoques tienen asociados grados de subjetividad. En el primero se presenta la decisión de la selección de coeficientes de Manning a partir de tabulaciones, lo cual puede variar en función del criterio particular de quien aborda el problema. En el segundo enfoque, la subjetividad surge a la hora de seleccionar alguna parametrización del número de Strickler por sobre las demás. Esta selección debe ser acorde con condiciones similares bajo las cuales fueron deducidas. Sin embargo, el grado de similitud entre cauces es lo que convierte a este enfoque en uno también subjetivo. Para mejorar esto, se consideró un parámetro de calibración de Manning el cual se adiciona a los coeficientes brindados por las diferentes parametrizaciones y tiene como objetivo dar cuenta de particularidades del cauce, como obstrucciones, vegetación, curvas, etc. Por ejemplo, en el contexto de Cowan (Chow, 1994) el coeficiente de Manning básico sería el representado por las diferentes parametrizaciones y la calibración daría cuenta de las particularidades del cauce. En este mismo contexto si se cuenta con información granulométrica a lo largo del cauce, una selección adecuada de alguna parametrización y una buena calibración, el segundo enfoque tiene la ventaja de reflejar la variabilidad del coeficiente de Manning básico en estos tipos de lechos.

Entonces, la motivación de este trabajo de titulo es presentar una herramienta que sea capaz de extender la aplicación de la ecuación de Manning a un rango para el cual no fue deducida, mediante la implementación de diferentes parametrizaciones del número de Strickler. Además se

desprenden una serie de consecuencias asociadas al cálculo adecuado de coeficientes de Manning, por ejemplo un cálculo del eje hidráulico más preciso que podrá ser considerado para el diseño de obras de ingeniería civil, definir caudales ecológicos u otros.

1.2 Objetivos y Alcances

1.2.1 Objetivo Principal

El objetivo principal de este trabajo es facilitar, mediante el diseño e implementación de un software, el proceso iterativo de cálculo de ejes hidráulicos en cauces fluviales con lechos macro rugosos, en los cuales se considera que el número de Strickler es una función no lineal que depende del previo conocimiento del cálculo del eje hidráulico y la granulometría del lecho.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Diseñar e implementar un software capaz de acoplarse al software HEC-RAS y realizar los cálculos en forma iterativa, sin necesidad que el usuario realice el proceso iterativo de cálculo del número de Strickler en forma manual y consecuentemente el cálculo del coeficiente de Manning.

- Presentar una herramienta que amplíe el espectro de toma decisiones en relación a los cálculos de ejes hidráulicos, debido a que se presentan distintas alternativas, representadas mediante diferentes parametrizaciones del número de Strickler, para el cálculo de ejes hidráulicos.

- Realizar una aplicación real a un cauce de secciones transversales conocidas y de lecho macro rugoso, en donde se comparen los resultados del eje hidráulico entre las distintas parametrizaciones del número de Strickler propuestas por los diferentes autores.

1.2.3 Alcances

Los alcances a los que está ligada la herramienta de acople a HEC-RAS, denominada MR-HR, son:

- No modifica el código fuente de HEC-RAS, sino que lo llama mediante Windows.

- No implementa algoritmo de cálculo de ejes hidráulicos, sino que los obtiene mediante la interacción con HEC-RAS.

- Resuelve problemas en régimen permanente, con flujos turbulentos plenamente desarrollados, lechos con pared hidrodinámicamente rugosa, granulometrías gruesas (gravas), lechos sin formas de fondo, flujos gradualmente variados y uniformes.

- Sólo utiliza las siguientes parametrizaciones del número de Strickler: Keulegan (1938), Limerinos (1970), Parker y Peterson (1980) y Ayala y Oyarce (1993).

Además está limitado por la interacción con HEC-RAS, lo cual se desarrolla en forma extensa en la sección (3.3) la cual trata acerca de las relaciones existentes entre MR-HR y HEC-RAS. Los requerimientos computacionales se muestran en el anexo (A.3).

1.3 Contenido del Informe

El resto del presente informe consta de las siguientes partes: En el Capítulo 2 se realiza una revisión de antecedentes de pérdidas de cargas debido al efecto del sedimento del lecho y, en particular, se enfoca en las parametrizaciones del número de Strickler que son implementadas en el software MR-HR. En el Capítulo 3 se define la implementación de la herramienta MR-HR junto con su forma de operación y ajustes a las parametrizaciones anteriormente señaladas en el Capítulo 2. En el Capítulo 4 se realiza una aplicación a un tramo del río Baker, comparando los resultados brindados por las diferentes parametrizaciones seleccionadas y, finalmente, en el Capítulo 5 se desarrollan las conclusiones y alcances del trabajo.

Capítulo 2. Revisión de Antecedentes

2.1 Pérdida de Carga en Lechos Macro Rugosos

Los antecedentes recopilados son válidos para granulometrías gruesas, en particular, para lechosos gravosos con rugosidades relativas extremadamente altas, lo cual se denomina lecho macro rugoso. Este tipo de lechos se presenta, principalmente, en zonas montañosas de gran pendiente, donde la rugosidad relativa toma una valoración especial dado que se hace comparable el radió hidráulico con algún diámetro característico de sedimentos gruesos. El diámetro característico del sedimento grueso que genera la macro rugosidad es el de la coraza, sin embargo también es posible relacionarlo con algún diámetro característico de la granulometría integral del lecho.

El límite que define un lecho macro rugoso, depende de la rugosidad relativa, la cual se define como:

$$\text{Rugosidad Relativa} = \frac{d_s}{R_h} \tag{2.1}$$

Donde:

R_h: corresponde al radió hidráulico.

d_s: corresponde al diámetro característico del sedimento grueso, típicamente D_{90} o D_{84} para granulometrías integrales del lecho o D_{50} para granulometrías de la coraza, dependiendo del autor.

Cuando la rugosidad relativa es mayor o igual 0.1 se define un lecho como macro rugoso. Se pueden diferenciar dos efectos dominantes que afectan a la resistencia hidráulica en este tipo de lechos: la resistencia friccional clásica que se refiere a la resistencia hidráulica producida por el sedimento del lecho propiamente tal, y una resistencia de forma que está asociada a distintos patrones de formas del lecho, como por ejemplo: rizos, dunas, anti dunas, secuencias rápidos-

pozas, etc. Las primeras tres formas de fondo anteriormente señaladas se producen por acarreo de sedimento fino como la arena, y las secuencias rápidos-pozas se asocian a lechos gravosos. Sin embargo, en este trabajo no se consideró el efecto de formas de fondo y sólo se centró en el efecto que produce el sedimento propiamente tal. Bajo este enfoque, el efecto que produce la macro rugosidad es que se generan despegues y estelas en el flujo en torno a los sedimentos gruesos, que implica la existencia de una resistencia de forma debido a la fuerza de arrastre que se genera sobre los elementos de rugosidad del lecho que se agrega a la resistencia friccional clásica de un lecho hidrodinámicamente rugoso. En estas condiciones se ha determinado experimentalmente que la resistencia hidráulica del lecho aumenta considerablemente (Niño, 2003).

Con el propósito de facilitar la presentación de los antecedentes recopilados, a continuación se define la nomenclatura utilizada en la descripción de las variables que intervienen en las diversas expresiones propuestas en la literatura para predecir la pérdida de carga:

R_h : corresponde al radio hidráulico. $[m]$

d_s : corresponde al diámetro característico del sedimento grueso, típicamente D_{90} o D_{84} para granulometrías integrales o D_{50} para granulometrías de la coraza, dependiendo del autor. $[m]$

S : corresponde a la pendiente del terreno. $[m/m]$

τ_o : corresponde al esfuerzo de corte medio sobre el lecho. $\left[\frac{kg}{m \cdot s^2}\right]$

U : corresponde a la velocidad media del escurrimiento. $[m/s]$

u^* : corresponde a la velocidad friccional o de corte. $[m/s]$

n : corresponde a el coeficiente de Manning. $[s/m^{1/3}]$

S_t : corresponde al número adimensional de Strickler.

C_f : corresponde a un coeficiente o factor de fricción adimensional.

C_{chezy} : corresponde al coeficiente de Chezy. [$m^{1/2}/s$]

y : corresponde a la altura del escurrimiento. $[m]$

g : corresponde a la aceleración de gravedad. $[m/s^2]$

ρ : corresponde a la densidad del agua. $[kg/m^3]$

y_0 : corresponde a una constante de integración. $[m]$

κ : corresponde a una constante universal característica de la turbulencia o también conocida como la constante de Von Karman, adimensional.

Como se mencionó anteriormente, la condición para que un lecho sea macro rugoso es que la rugosidad relativa sea mayor a 0.1. En forma equivalente, en este trabajo se optó por el inverso de la rugosidad relativa, por lo tanto se dice que un escurrimiento se desarrolla sobre un lecho macro rugoso si:

$$\frac{R_h}{d_s} \leq 10 \tag{2.2}$$

Para poder caracterizar escurrimientos en lechos macro rugosos, es necesaria la introducción de algún coeficiente de fricción que permita dar cuenta de los efectos que produce el lecho en el escurrimiento. Desde el punto de vista de la ingeniería Civil, el coeficiente de Manning es el más usado a pesar que es un coeficiente dimensional. De esta forma, el presente trabajo de título aborda el cálculo de ejes hidráulicos mediante el coeficiente de Manning.

De acuerdo a la ecuación de Strickler, el coeficiente de Manning depende del tamaño del sedimento del lecho de la siguiente forma:

$$n = \frac{d_s^{1/6}}{26.4} \tag{2.3}$$

En base a la relación (2.3), se define un parámetro adimensional que relaciona el coeficiente de Manning y el diámetro característico del sedimento grueso. Este parámetro se denomina el número de Strickler, S_t, y se define como:

$$S_t = \frac{\sqrt{g} \cdot n}{d_s^{1/6}} \tag{2.4}$$

Reemplazando la ecuación (2.3) en la ecuación (2.4), resulta que el número de Strickler es un número igual a 0.12, independiente del tipo de lecho. Este valor fue determinado por Strickler (1923) y es válido para lechos rugosos y de granulometrías gruesas considerando d_s=d_{90}.

Diversos investigadores han estudiado escurrimientos en lechos macro rugosos (Keulegan, 1938; Limerinos, 1970; Parker y Peterson, 1980; Ayala y Oyarce, 1993) y han concluido que, a diferencia de Strickler de (2.3), en lechos macro rugosos, el número de Strickler está fuertemente influenciado por una variable adicional al diámetro característico de los sedimentos gruesos, la cual es el radio hidráulico. Esto provoca una variabilidad en el número de Strickler.

Entonces, para entender las relaciones que se presentan en estos escurrimientos sobre lechos macro rugosos, se recurre a una ley de resistencia hidráulica general, la cual plantea la siguiente relación:

$$\tau_o = C_f \cdot \rho \cdot U^2 \tag{2.5}$$

Además, se tiene que a partir del esfuerzo de corte sobre el fondo se define una velocidad friccional o de corte, como:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} \tag{2.6}$$

Por lo tanto, manipulando las ecuaciones (2.5) y (2.6) se obtiene que:

$$\frac{U}{u^*} = \sqrt{\frac{1}{C_f}} \tag{2.7}$$

Luego, considerando equilibrio de fuerzas en canales abiertos, para flujos permanentes y uniformes se tiene que:

$$\tau_o = \rho \cdot g \cdot R_h \cdot S \tag{2.8}$$

Por lo tanto, reemplazando la ecuación (2.8) en (2.6) se obtiene la siguiente relación para la velocidad friccional o de corte:

$$u^* = \sqrt{g \cdot R_h \cdot S} \tag{2.9}$$

Además, considerando las mismas condiciones anteriores, es decir, flujo permanente y uniforme, se tiene la ecuación de Manning:

$$U = \frac{\sqrt{S}}{n} \cdot R_h^{\,2/3} \tag{2.10}$$

Reemplazando los resultados de las ecuaciones (2.10) y (2.9) en la ecuación (2.7) se obtiene:

$$C_f = \left(\frac{\sqrt{g} \cdot n}{R_h^{\,1/6}} \right)^2 \tag{2.11}$$

Finalmente, es posible sustituir la ecuación (2.4) en la ecuación (2.11), obteniéndose:

$$\sqrt{\frac{1}{C_f}} = \frac{U}{u^*} = \frac{1}{S_t} \cdot \left(\frac{R_h}{d_s} \right)^{1/6} \tag{2.12}$$

Notar que en la deducción de la ecuación (2.12), el coeficiente de fricción adimensional es una propiedad que solo depende del inverso de la rugosidad relativa. Esto es válido sólo para flujos turbulentos plenamente desarrollados y, además, con pared hidrodinámicamente rugosa.

Además, es interesante notar de esta ecuación que si es posible conocer la distribución de velocidades, entonces es posible conocer el número de Strickler y con ayuda de la ecuación (2.4) es posible conocer el coeficiente de Manning. Precisamente es la distribución de velocidades, la cual varía según los autores que estudiaron este fenómeno: Keulegan (1938); Limerinos (1970); Parker y Peterson (1980); Ayala y Oyarce (1993). En general, la mayoría de los autores señalados anteriormente concuerdan en la forma del cuociente de velocidades, basado el la ley de distribución de velocidades logarítmica de Prandtl (1926) von Karman (1930) (ambos citados en Keulegan, 1938). Sin embargo, difieren entre si en los valores de las constantes asociadas a esta ley. Esto se debe a que los valores de las constantes fueron determinadas de manera experimental sujetas a diferentes condiciones de terreno y/o laboratorio. En algunos casos, los estudios se limitaron a correlacionar datos suponiendo la forma del cuociente de velocidades y se seleccionaron los coeficientes que mejor se ajustaban a los datos, en relación a los coeficientes de Manning calculados con la ayuda tanto de mediciones de terreno y/o laboratorio como de la ecuación (2.10).

Por otra parte y en estricto rigor, la aplicabilidad de la ecuación de Manning está sujeta a flujos permanentes y uniformes, es decir, a problemas donde la altura de escurrimiento no varía ni espacialmente, ni temporalmente. Esto implica: cauces prismáticos y sin variación de ninguna propiedad tanto espacialmente como temporalmente. Sin embargo, más adelante en la sección (3.3) se extenderá su validez a problemas con escurrimientos gradualmente variados y a cauces no prismáticos.

Con respecto a la forma cómo se calcula el coeficiente de Manning en este trabajo, como se mencionó anteriormente, sólo es válido para flujos turbulentos plenamente desarrollados y con pared hidrodinámicamente rugosa. Si no se cumple está última condición, el coeficiente de Chezy y, consecuentemente, el coeficiente de Manning dependerán del número de Reynolds, dado que las fuerzas viscosas no son despreciables en la cercanía de la pared.

2.2 Diferencia entre Lechos Rugosos y Macro Rugosos

Vale la pena aclarar, antes de comenzar con la diferencia entre lechos, que el número de Strickler también suele ser interpretado como la constante de Strickler. La diferencia entre ambos es que el primero es representado por la ecuación:

$$S_t = \frac{\sqrt{g} \cdot n}{d_s^{1/6}}$$

Mientras que el segundo es representado por el cuociente:

$$\frac{n}{d_s^{1/6}} = \text{Constante de Strickler}$$

Notar que ambas definiciones son equivalentes, al número de Strickler se le agrega la raíz cuadrada de la gravedad para hacerlo adimensional.

La principal diferencia existente entre lechos rugosos y macro rugosos es la variabilidad de la constante de Strickler en lechos macro rugosos. En el primer tipo de lecho, con inversos de rugosidades relativas mayores que 10, es posible asumir que la constante de Strickler se comporta como tal, y su valor es igual a 0.0342 (Strickler, 1923). En el segundo tipo de lecho, la constante de Strickler es variable y depende del inverso de la rugosidad relativa. Datos recolectados de algunos ríos del noroeste de Estados Unidos y el río Mississippi dan cuenta de la diferencia entre ambos lechos (Chow, 1994), lo cual se muestra en la figura (2.1). Además se aprecia que el eje de la abscisas representa el cuociente entre el radio hidráulico y la altura de rugosidad (adimensional considerando tanto la altura de rugosidad como el radio hidráulico en pies), y en el eje de las ordenadas el cuociente entre el coeficiente de Manning y la altura de rugosidad elevada a un sexto. Si se supone que la altura de rugosidad k puede ser representada por algún diámetro característico ($k = d_s$), entonces se recupera la ecuación (2.2), es decir, el inverso de la rugosidad relativa.

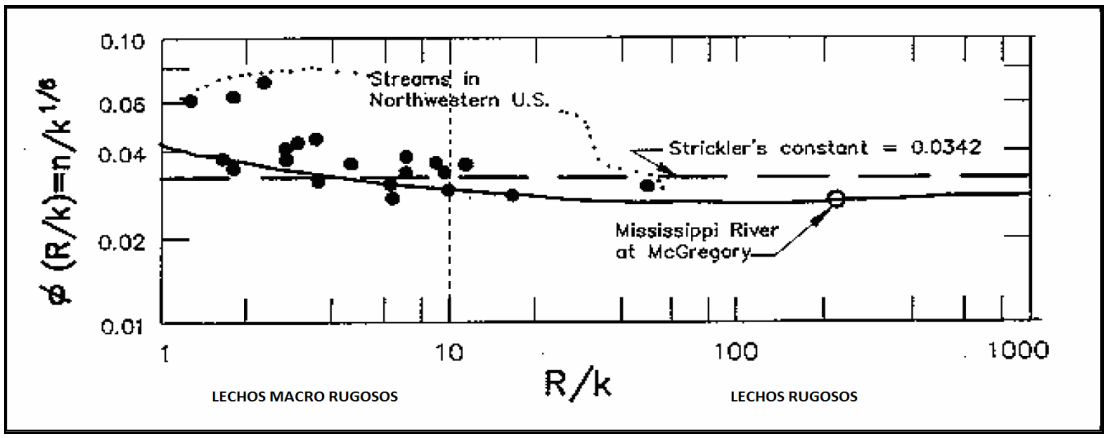


Figura 2.1: Representación Gráfica Constante de Strickler
Fuente: Chow (1994). Hidráulica de Canales Abiertos. Página 202.

Es interesante notar que la constante de Strickler para inversos de rugosidades relativas menores o iguales que 10 aumenta considerablemente, lo cual es cuantificado por las expresiones de Keulegan (1938), Limerinos (1970), Parker y Peterson (1980) y Ayala y Oyarce (1993). Por otra parte, para inversos de rugosidades relativas mayores que 10, se tiene que Strickler se vuelve constante igual al valor 0.0342. Este valor, propuesto por Strickler (1923), surge de observaciones reales realizadas en ríos de Suiza, y además de considerar la altura de rugosidad igual al diámetro medio de los sedimentos de fondo, es decir, $k = D_{50}$. Estudios posteriores realizados en *Waterways Experiment Station* (WES) (Maynard, 1991 citado en USACE, 2010b), mostraron que el valor de la constante de Strickler, considerando $k = D_{90}$ y para consideraciones de cálculo de caudales en cauces de lechos gravosos, debe ser 0.038, lo cual se muestra a continuación:

Reordenando la ecuación (2.3), resulta:

$$\frac{n}{d_s^{1/6}} = \frac{1}{26.4} \tag{2.13}$$

con d_s en metros. En forma equivalente resulta:

$$\frac{n}{d_s^{1/6}} = 0.038 \tag{2.14}$$

En la ecuación (2.14) se recupera el valor de la constante de Strickler 0.038. Luego reemplazando (2.14) en (2.4) resulta:

$$S_t = 0.12 \tag{2.15}$$

2.3 Parametrizaciones Consideradas

2.3.1 Keulegan (1938)

Keulegan (1938) propuso la siguiente expresión para el cuociente entre las velocidades media y friccional:

$$\frac{U}{u^*} = 2.5 \cdot \ln\left(12 \cdot \frac{R_h}{d_s}\right) \tag{2.16}$$

con $d_s = D_{90}$.

La ecuación (2.16), puede ser expresada en términos del número de Strickler, mediante la ayuda de la ecuación (2.12) y resulta:

$$S_t = \frac{\left(\frac{R_h}{d_s}\right)^{1/6}}{2.5 \cdot \ln\left(12 \cdot \frac{R_h}{d_s}\right)} \tag{2.17}$$

con $d_s = D_{90}$. El valor de S_t versus $\frac{R_h}{d_s}$ se muestra en la figura (2.2).

La ecuación (2.16) está basada en la ley de distribución de velocidades logarítmica de Prandtl (1926) von Karman (1930) (ambos citados en Keulegan, 1938). Está ley es la siguiente:

$$\frac{U}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{y}{y_0}\right) \tag{2.18}$$

Consideraciones teóricas indican que la constante κ debería ser independiente de la naturaleza de la superficie de la pared. Esto ha sido verificado en casos de flujos en tuberías circulares por von Karman (Karman, 1930 citado en Keulegan, 1938). Con respecto a la constante de integración y_o, Keulegan la denominó "característica de la superficie", ésta varía en función de la velocidad friccional y de acuerdo a la rugosidad de la pared (Keulegan, 1938).

Para determinar la constante y_o, Keulegan se apoyó en estudios experimentales proporcionados por Nikuradse (1933) (citado en Keulegan, 1938), quien realizó experimentaciones en tuberías circulares con arena. Finalmente, Keulegan corroboró la ecuación (2.16) mediante experimentaciones realizadas por Bazin (1865) (citado en Keulegan, 1938) en canales abiertos, entre los años 1855 al 1860. La experimentación mediante la cual se validó la ecuación (2.16), comprende los siguientes rangos: pendientes entre [0.0015 - 0.0089], inversos de rugosidad relativas entre [6.3 - 1,030], radios hidráulicos entre [0.048 - 0.396] m, velocidades medias entre [0.39 - 2.61] m/s, temperaturas entre [7.5 - 19] °C, secciones transversales prismáticas rectangulares y de formas variadas. De esta forma, los requisitos que debe cumplir, simultáneamente, la ecuación (2.16) para ser válida son: lechos con granulometrías finas[1] (arenosas), flujos turbulentos plenamente desarrollados, lechos con pared hidrodinámicamente rugosa y ausencia de formas de fondo.

[1] En estricto rigor, Keulegan basado en experimentación de Nikuradse con arenas, determinó en su publicación el concepto de rugosidad de arena equivalente. Con esto es posible evaluar problemas con diferentes tipos de granulometrías, aparte de arenas. Sin embargo, en este trabajo al fijar $d_s = 1 \cdot D_{90}$ solo tiene sentido para granulometrías arenosas.

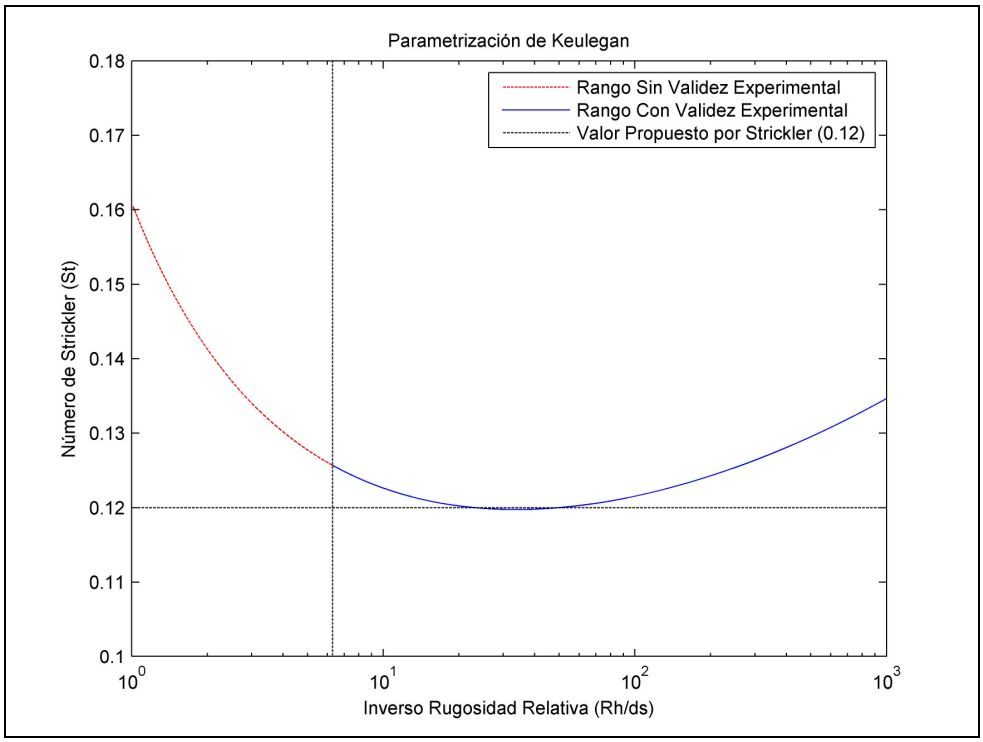


Figura 2.2: Representación Gráfica Ecuación (2.17)

Fuente: Elaboración Propia

2.3.2 Limerinos (1970)

Limerinos (1970) propuso la siguiente expresión para el cuociente entre las velocidades media y friccional:

$$\frac{U}{u^*} = 2.5 \cdot \ln\left(3.8 \cdot \frac{R_h}{d_s}\right) \tag{2.19}$$

con $d_s = D_{84}$.

La ecuación (2.19), puede ser expresada en términos del número de Strickler, mediante la ayuda de la ecuación (2.12) y resulta:

$$S_t = \frac{\left(\frac{R_h}{d_s}\right)^{1/6}}{2.5 \cdot \ln\left(3.8 \cdot \frac{R_h}{d_s}\right)} \tag{2.20}$$

con $d_s = D_{84}$. El valor de S_t versus $\frac{R_h}{d_s}$ se muestra en la figura (2.3).

La ecuación (2.19) está basada en un estudio experimental realizado en terreno. La expresión original propuesta por Limerinos fue:

$$\frac{n}{R_h^{1/6}} = \frac{0.0926}{1.16 + 2.0 \cdot \log\left(\frac{R_h}{d_s}\right)} \tag{2.21}$$

La expresión (2.21) está en unidades inglesas, sin embargo es posible transformarla al sistema internacional y expresarla en términos del cuociente de velocidades mediante las siguientes expresiones:

$$C_{chezy} = \frac{1.486 \cdot R_h^{1/6}}{n} \tag{2.22}$$

$$C_f = \frac{g}{C_{chezy}^{\ 2}} \tag{2.23}$$

Finalmente utilizando la ecuación (2.7) es posible deducir la expresión (2.19), la cual está en términos del cuociente de velocidades.

El estudio experimental realizado por Limerinos abarcó once cauces naturales en California, Estados Unidos, donde se midieron: caudales, alturas de escurrimiento, velocidades, etc. La deducción de la expresión (2.21) o su equivalente (2.19) se basó en que Limerinos sabía la forma que debería tener la relación buscada, debido a la revisión bibliográfica realizada previamente. Por lo tanto, se limitó a correlacionar los datos y escogió los coeficientes que mejor

se ajustaban ellos. Es interesante destacar que estos coeficientes, si son vistos del punto de vista teórico según la ecuación (2.18), corresponden a la constante de von Karman y a la constante de integración que es característica de la superficie (Keulegan, 1938). Bajo este punto de vista, solo se aprecia una diferencia con respecto a la ecuación brindada por Keulegan (2.16) en la constante de integración, lo cual se debe a que Keulegan (1938) determinó el valor de esta constante para arenas y Limerinos para gravas.

La experimentación de Limerinos mediante la cual se validó la ecuación (2.19), comprende los siguientes rangos: rango de inversos de rugosidades relativas entre [1.06 - 68.05], caudales entre [5.97 - 254.85] m^3/s y diámetros característicos entre [0.02 - 0.75] m. Los requisitos que debe cumplir, simultáneamente, la ecuación (2.19) para ser válida son: lechos con granulometrías gruesas (gravas), flujos turbulentos plenamente desarrollados, lechos con pared hidrodinámicamente rugosa, ausencia de formas de fondo, cauces rectos, con poca o nula vegetación, cauces relativamente anchos de sección trapezoidal y cauces sin irregularidades tanto de fondo como en las riberas. Limerinos en su estudio escogió cauces con todas las características descritas anteriormente, debido a que buscaba una relación que cuantificara el efecto aislado de la resistencia que produce el sedimento de fondo. Su idea se basaba en que si lograba calcular en forma aislada el efecto del sedimento de fondo, luego podría corregir dicho valor en presencia de cauces: sinuosos, con vegetación, irregularidades, etc., mediante una expresión propuesta en la literatura, como por ejemplo, la de Cowan (Chow, 1994).

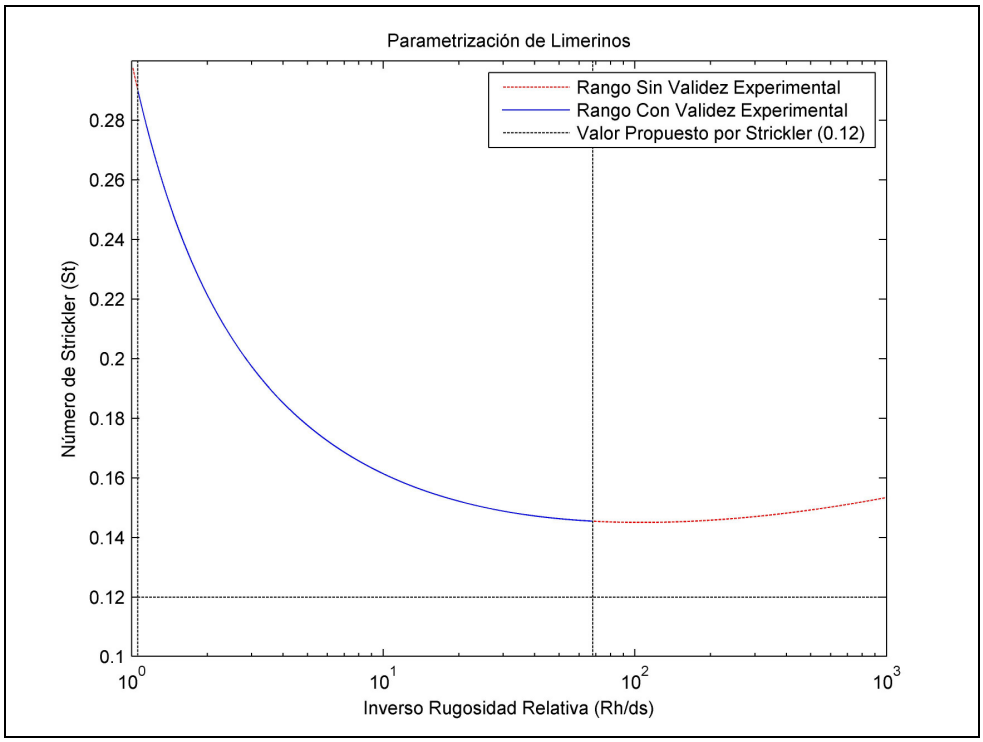


Figura 2.3: Representación Gráfica Ecuación (2.20)
Fuente: Elaboración Propia

2.3.3 Parker y Peterson (1980)

Parker y Peterson (1980) propusieron la siguiente expresión para el cuociente entre las velocidades media y friccional, debida solamente al efecto en la resistencia producida por el sedimento de fondo (sin incluir formas de fondo):

$$\frac{U}{u^*} = 2.46 \cdot \ln\left(5.5 \cdot \frac{R_h}{d_s}\right) \tag{2.24}$$

con $d_s = D_{90}$.

La ecuación (2.24), puede ser expresada en términos del número de Strickler, mediante la ayuda de la ecuación (2.12) y resulta:

$$S_t = \frac{\left(\frac{R_h}{d_s}\right)^{1/6}}{2.46 \cdot \ln\left(5.5 \cdot \frac{R_h}{d_s}\right)} \tag{2.25}$$

con $d_s = D_{90}$. El valor de S_t versus $\frac{R_h}{d_s}$ se muestra en la figura (2.4).

El estudio de Parker y Peterson se centra en predecir la pérdida de carga producida por una forma de fondo particular, la cual obedece a secuencias de rápidos-pozas. Un problema recurrente que se enfrenta en estos estudios es que diversos factores intervienen en la pérdida de carga, aparte de los efectos de las formas de fondo y del sedimento del lecho. Para solucionar esto, Parker y Peterson corroboraron que en los cauces naturales estudiados en Alberta, Canadá, los efectos dominantes que contribuyen a la resistencia son la forma de fondo rápido-poza y el sedimento del lecho. Entonces proponen linealizar ambos efectos y basarse en estudios previos, para una expresión que de cuenta de la pérdida de carga producida por el sedimento del lecho. Con esto, y por diferencia, son capaces de cuantificar el efecto producido por las formas de fondo rápidos-pozas.

Los estudios previos en los que se basaron Parker y Peterson para la deducción de la ecuación (2.24), fueron los proporcionados por: Keulegan (1938), Limerinos (1970) y Kamphuis (1974) (citado en Parker y Peterson, 1980).

Por otra parte, para la predicción de la expresión que de cuenta de la pérdida de carga por la forma de fondo particular, Parker y Peterson se basaron en mediciones de terreno brindados por Kellerhals, Neill y Bray (1972) (citado en Parker and Peterson, 1980). Sin embargo, esta información es representativa de cauces con secuencias de rápidos-pozas, las cuales no son consideradas en este trabajo de título. La expresión (2.24) está sujeta a condiciones similares las propuestas por Limerinos (1970).

Los requisitos que debe cumplir, simultáneamente, la ecuación (2.24) para ser válida son: lechos con granulometrías gruesas (gravas), flujos turbulentos plenamente desarrollados, lechos con pared hidrodinámicamente rugosa y ausencia de formas de fondo.

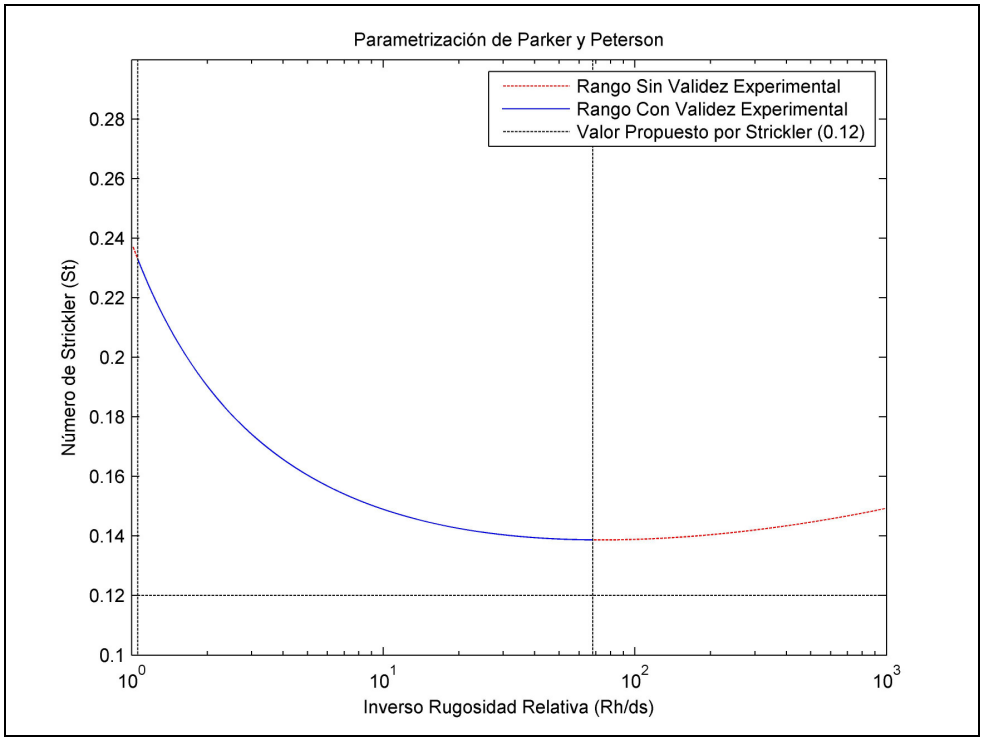


Figura 2.4: Representación Gráfica Ecuación (2.25)
Fuente: Elaboración Propia

2.3.4 Ayala y Oyarce (1993)

Ayala y Oyarce en 1993 propusieron la siguiente expresión para el cuociente entre las velocidades media y friccional:

$$\frac{U}{u^*} = 3.3 \cdot \left(\frac{R_h}{d_s} \right)^{0.57} \tag{2.26}$$

con $d_s = D_{90}$.

La ecuación (2.26), puede ser expresada en términos del número de Strickler, mediante la ayuda de la ecuación (2.12) y resulta:

$$S_t = \frac{\left(\frac{R_h}{d_s}\right)^{1/6}}{3.3 \cdot \left(\frac{R_h}{d_s}\right)^{0.57}} \tag{2.27}$$

con $d_s = D_{90}$. El valor de S_t versus $\frac{R_h}{d_s}$ se muestra en la figura (2.5).

El estudio experimental realizado por Ayala y Oyarce consistió en la producción de un modelo físico a escala 1:30 de un prototipo representativo de cauces cordilleranos Andinos. El prototipo utilizado fue un tramo del río Mapocho de 300 metros de longitud, ubicado en un sector denominado los Almendros, Chile, con una pendiente media de 0.0154. Luego de construido el modelo se realizaron experiencias sin arrastre de sedimentos, sin arrastre de sedimentos con lecho previamente acorazado y con arrastre generalizado. Con los resultados de estas experiencias propusieron la expresión (2.26), basada en correlación de datos, la cual da cuenta de las experiencias anteriormente señaladas. Es interesante notar que a diferencia de las ecuaciones propuestas anteriormente por diferentes autores, la ecuación (2.26) es del tipo monomial y no logarítmica. Aguirre y Fuentes (1987) (citado en Oyarce, 1993) postulan que para lechos macro rugosos, la ecuación (2.18) que representa la ley de distribución de velocidades logarítmica de Prandtl (1926) von Karman (1930) (ambos citados en Keulegan, 1938) deja de ser válida a una determinada profundidad debido a la presencia de grandes sedimentos en el fondo. Estos generarían un perfil de velocidades constante en sus cercanías debido a las estelas de flujo que se produce en torno a estos.

La experimentación de Ayala y Oyarce mediante la cual se calibró la ecuación (2.26), comprende los siguientes rangos correspondientes al prototipo: inversos de rugosidades relativas entre [2.05 - 7.23], caudales entre [11.1 - 204] m^3/s y diámetros característicos entre [0.04 - 0.47] m. Los requisitos que debe cumplir, simultáneamente, la ecuación (2.26) para ser válida son: lechos con granulometrías gruesas (gravas), flujos turbulentos plenamente desarrollados, lechos

con pared hidrodinámicamente rugosa, ausencia de formas de fondo, régimen de escurrimiento torrencial y fuertes pendientes típicas de cauces cordilleranos andinos.

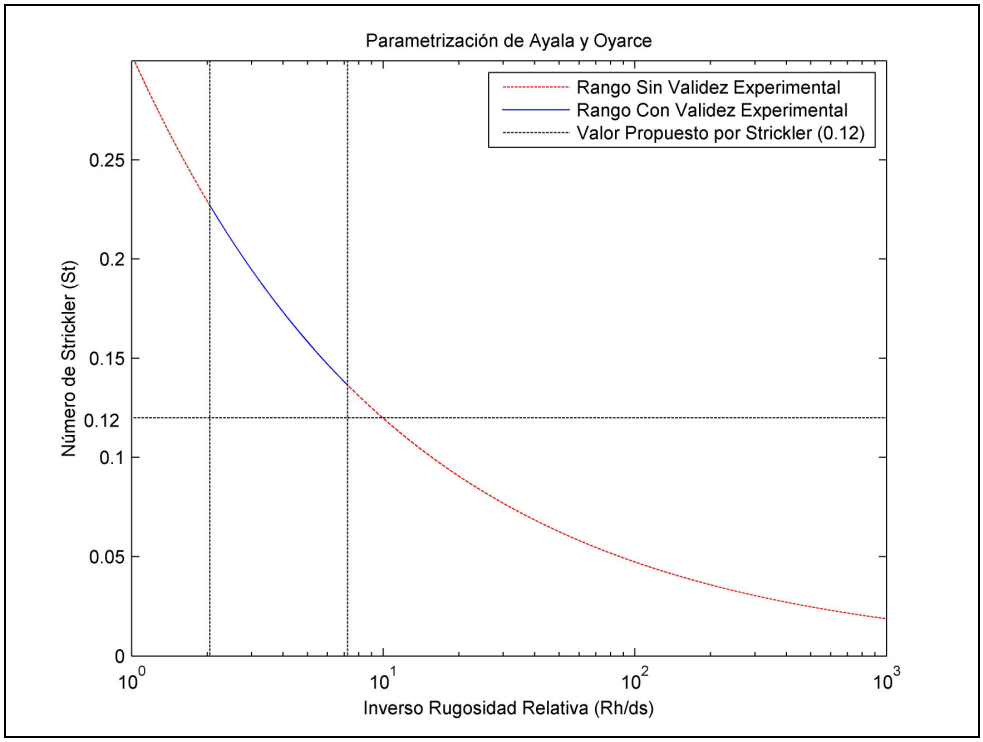


Figura 2.5: Representación Gráfica Ecuación (2.27)
Fuente: Elaboración Propia

2.4 Resumen de Parametrizaciones Consideradas

En general, las expresiones relacionadas con la pérdida de carga tienen un comportamiento logarítmico común, el cual está basado en la ley de distribución de velocidades logarítmicas, salvo la expresión propuesta por Ayala y Oyarce (1993), la cual es del tipo monomial. Además son, en general, válidas para granulometrías gruesas y extendidas, salvo Keulegan (1938) que es válida para arenas.

Todas las expresiones comparten los siguientes requisitos para ser válidas: flujos turbulentos plenamente desarrollados, lechos con pared hidrodinámicamente rugosa y ausencia de formas de fondo, esto último debido a que las ecuaciones solo consideran el efecto en la pérdida de carga producida por el sedimento del lecho. En estricto rigor, el efecto del sedimento es atribuible a la coraza de los lechos, sin embargo, una medida indirecta del sedimento acorazado

es la medición de un diámetro característico del sedimento del lecho original, lo cual es expresado por los distintos autores como D_{90} o D_{84}, en particular, Ayala y Oyarce (1993) determinaron que $D_{50\,coraza} = D_{90}$. Se repite que tanto D_{90} como D_{84} deben estar asociados a la granulometría integral del lecho, mientras que $D_{50\,coraza}$ debe estar asociado a la granulometría de la coraza.

Si bien, los diferentes autores sugieren amplios rangos de validez para sus parametrizaciones del número de Strickler, en términos del inverso de la rugosidad relativa, no existe un consenso en cuanto al valor del número de Strickler en el límite entre lechos rugosos y macro rugosos, lo que se aprecia en la siguiente tabla.

Tabla 2.1: Valores Correspondientes a Límites entre Lechos Rugosos y Macro Rugosos

Autor	$S_t\left(\frac{R_h}{d_s}=10\right)$
Keulegan (1930)	0.123
Limerinos (1970)	0.161
Parker y Peterson (1980)	0.149
Ayala y Oyarce (1993)	0.120

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla (2.1) se puede apreciar que tanto Limerinos (1970) como Parker y Peterson (1980) brindan valores superiores a 0.12 para la transición entre lechos rugosos y macro rugosos, mientras que Keulegan (1930) converge a dicho valor. Entonces en función de los antecedentes recopilados en este trabajo de título, se adoptó como valor de transición entre lechos 0.12 y se mantiene dicho valor constante para lechos rugosos. En este contexto, las figuras: (2.2), (2.3), (2.4) y (2.5) que representan el número de Strickler en función del inverso de la rugosidad relativa, fueron modificadas para lograr una transición suave entre lechos macro rugosos y rugosos propuesta en este trabajo de título. Esto se describe en la sección (3.1) mediante modificaciones lineales y parabólicas. El sentido de modificar dichas parametrizaciones y extender su aplicabilidad fuera de su rango de validez recae en la transición que deben cumplir según la recopilación realizada en este trabajado de título.

En la figura (2.6) se resumen gráficamente las parametrizaciones del número de Strickler revisadas en este capítulo. En la tabla (2.2) se muestra un resumen con estas parametrizaciones indicando su autor, expresión y rango de validez.

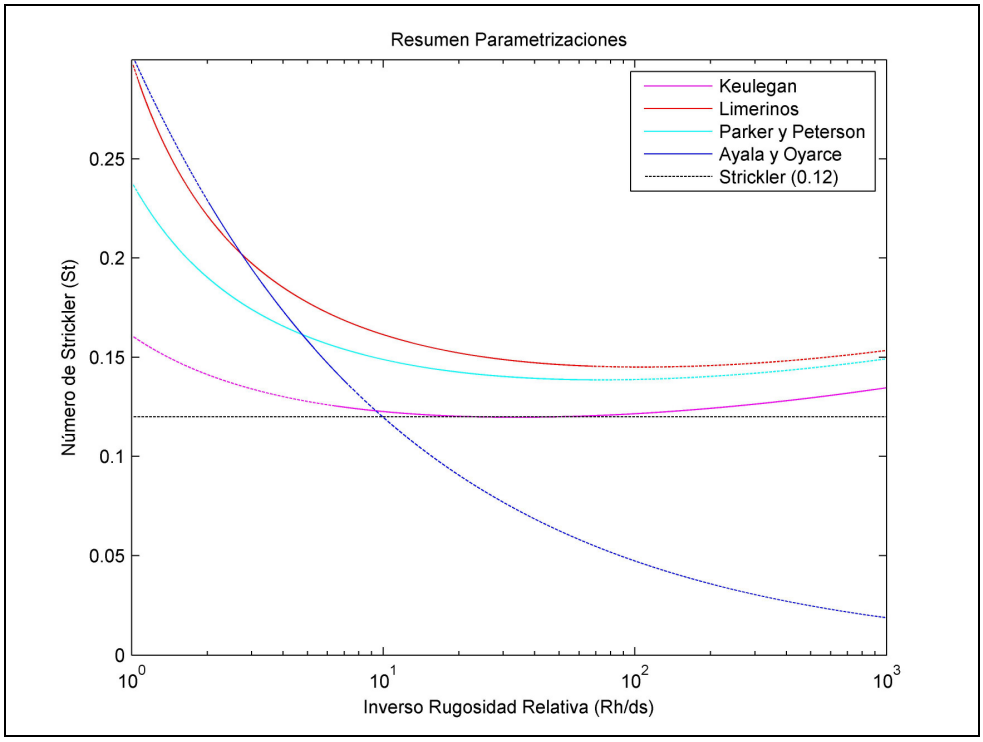


Figura 2.6: Resumen Parametrizaciones del Número de Strickler Originales Según Autor.
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 2.2: Resumen Parametrizaciones del Número de Strickler.

Autor	**Expresión**	**Rango de Validez** $(\frac{R_h}{d_s})$	**Supuesto**
Strickler (1928)	0.12	>10	Granulometrías Gruesas (gravas)
Keulegan (1930)	$S_t = \dfrac{\left(\frac{R_h}{d_s}\right)^{1/6}}{2.5 \cdot \ln\left(12 \cdot \frac{R_h}{d_s}\right)}$	[6.3 - 1,030]	Granulometrías Finas (arenas)

Tabla 2.2 (continuación): Resumen Parametrizaciones del Número de Strickler.

Autor	**Expresión**	**Rango de Validez** ($\frac{R_h}{d_s}$)	**Supuesto**
Limerinos (1970)	$S_t = \dfrac{\left(\frac{R_h}{d_s}\right)^{1/6}}{2.5 \cdot \ln\left(3.8 \cdot \frac{R_h}{d_s}\right)}$	[1.06 - 68.05]	Granulometrías Gruesas (gravas)
Parker y Peterson (1980)	$S_t = \dfrac{\left(\frac{R_h}{d_s}\right)^{1/6}}{2.46 \cdot \ln\left(5.5 \cdot \frac{R_h}{d_s}\right)}$	[1.06 - 68.05]	Granulometrías Gruesas (gravas)
Ayala y Oyarce (1993)	$S_t = \dfrac{\left(\frac{R_h}{d_s}\right)^{1/6}}{3.3 \cdot \left(\frac{R_h}{d_s}\right)^{0.57}}$	[2.05 - 7.23]	Granulometrías Gruesas (gravas)

Fuente: Elaboración Propia

Capítulo 3. Implementación de la Herramienta: MR-HR

Este capítulo surge de la necesidad de comprender los fundamentos de MR-HR como su interacción con HEC-RAS. Para esto se explican las modificaciones que se realizaron a las parametrizaciones consideradas en la sección (2.3). Luego, se mencionan tanto los atributos como los alcances, desde el punto de vista hidráulico, a los que está sujeto MR-HR. Para finalmente, explicar el esquema de operación de este último programa y como este interactúa con HEC-RAS, junto a los resultados proporcionados por MR-HR.

3.1 Ajuste de Parametrizaciones

Con el propósito de facilitar la presentación de las deducciones realizadas en este capítulo, a continuación se muestra la nomenclatura utilizada:

$f(x)$: corresponde a la parametrización del número de Strickler de Keulegan (1938), Limerinos (1970), Parker y Peterson (1980) y Ayala y Oyarce (1993).

$g(x)$: corresponde a la parametrización lineal del número de Strickler aquí propuesta.

$h(x)$: corresponde a la parametrización parabólica del número de Strickler aquí propuesta.

x : corresponde al inverso de la rugosidad relativa.

Z_i : corresponde a la cota de fondo del lecho de la sección i-ésima, medida con respecto a un datum de referencia. $[m]$

Y_i : corresponde a la altura de escurrimiento de la sección i-ésima, medida con respecto a la cota de fondo del lecho. $[m]$

V_i : corresponde a la velocidad media de la sección i-ésima. $[m/s]$

a_i : corresponde al coeficiente de Coriolis asociado a la sección i-ésima.

Se propone realizar ajustes a las parametrizaciones del número de Strickler, expuestas en la sección (2.3), para lograr una transición suave entre los escurrimientos desarrollados en lechos

macro rugosos y rugosos, lo cual se justificó en la sección (2.4). Esto se realizó haciendo tanto un ajuste lineal como otro parabólico, apoyado en la generalización de la forma de las ecuaciones de: Keulegan (1938), Limerinos (1970) y Parker y Peterson (1980), dado que siguen una ley logarítmica[2], es decir, la forma genérica de estas ecuaciones es:

$$f(x) = \left(\frac{1}{k_1}\right) \cdot \frac{x^{1/6}}{\ln(k_2 \cdot x)} \tag{3.1}$$

3.1.1 Ajuste Lineal

Se proyectó una línea recta, tal que en un punto x^* la recta compartiera tanto el mismo valor de la parametrización, como la misma derivada, sujeto a que en el fin de la zona macro rugosa $x = Rh/ds = 10$ se cumple que la recta debe tener el valor del Strickler constante e igual a 0.12. Gráficamente, se tiene lo siguiente:

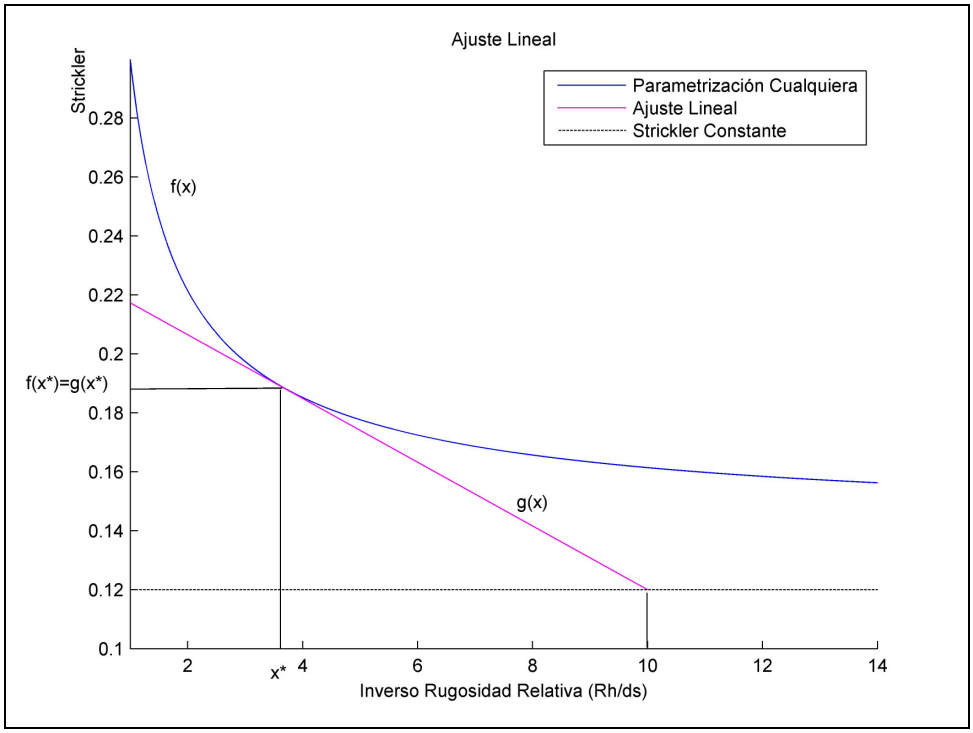


Figura 3.1: Representación Gráfica Ajuste Lineal
Fuente: Elaboración Propia

[2] Notar que Ayala y Oyarce obedece a una ley de Potencia, por lo que no se incluye en este análisis.

El planteamiento formal, es el que se muestra a continuación:

Sea $g(x)$ la recta que representa la parametrización lineal del número de Strickler:

$$g(x) = \left.\frac{df}{dx}\right|_{x=x^*} \cdot x + b \tag{3.2}$$

Con las siguientes condiciones de borde:

$$g(10) = 0.12 \quad \Rightarrow \quad \left.\frac{df}{dx}\right|_{x=x^*} \cdot 10 + b = 0.12 \tag{3.3}$$

$$g(x^*) = f(x^*) \quad \Rightarrow \quad \left.\frac{df}{dx}\right|_{x=x^*} \cdot x^* + b = f(x^*) \tag{3.4}$$

Restando la ecuación (3.3) a la ecuación (3.4), resulta:

$$\left.\frac{df}{dx}\right|_{x=x^*} \cdot (10 - x^*) = 0.12 - f(x^*) \tag{3.5}$$

Por otra parte, derivando la ecuación (3.1), se obtiene:

$$\frac{df}{dx} = \left(\frac{1}{6 \cdot k_1}\right) \cdot \frac{1}{x^{5/6} \cdot \ln(k_2 \cdot x)} - \left(\frac{1}{k_1}\right) \cdot \frac{1}{x^{5/6} \cdot \ln(k_2 \cdot x)^2} \tag{3.6}$$

Finalmente, reemplazando la ecuación (3.6) y (3.1) en la ecuación (3.5), resulta:

$$\left(\left(\frac{1}{6 \cdot k_1}\right) \cdot \frac{1}{x^{*5/6} \cdot \ln(k_2 \cdot x^*)} - \left(\frac{1}{k_1}\right) \cdot \frac{1}{x^{*5/6} \cdot \ln(k_2 \cdot x^*)^2}\right) \cdot (10 - x^*) = 0.12 - \left(\frac{1}{k_1}\right) \cdot \frac{x^{*1/6}}{\ln(k_2 \cdot x^*)} \tag{3.7}$$

Resolviendo la ecuación (3.7), se encuentra el punto x^*, donde nace la recta que comparte tanto la misma derivada como el mismo valor de la parametrización. Luego de conocido el punto

x*, basta con reemplazar en la ecuación (3.3) o en (3.4) para conocer el coeficiente de corte de la línea recta con el eje de las ordenadas, es decir, el coeficiente b.

3.1.2 Ajuste Parabólico

Con la finalidad de realizar una transición suave en las cercanías del inverso de la rugosidad relativa (Rh/ds) igual a 10, se propuso una transición parabólica[3]. Está transición ocurre en el intervalo [8,12] en el dominio del inverso de la rugosidad relativa. La parábola debe ser tal que, en su extremo inferior ($x = 8$), debe tener el mismo valor de la recta proyectada anteriormente. Además en su extremo superior ($x = 12$) debe tener un valor igual a 0.12 y su derivada debe ser nula. Gráficamente, la idea es la siguiente:

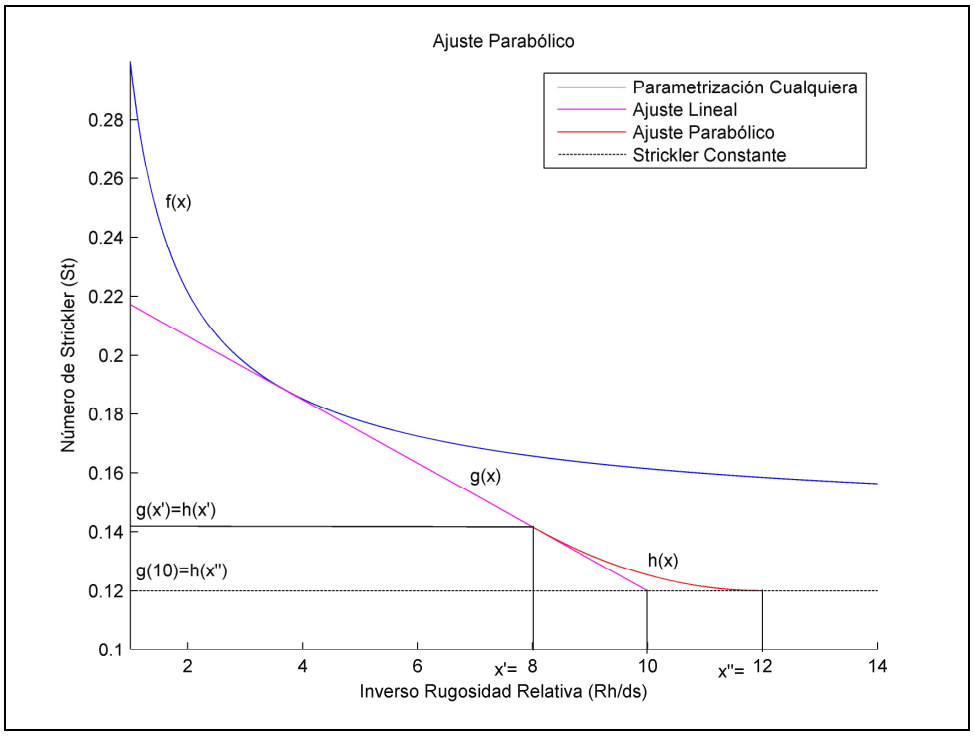


Figura 3.2: Representación Gráfica Ajuste Parabólico
Fuente: Elaboración Propia

[3] La selección de los puntos del dominio de la parábola x [8,12] fueron realizados en forma arbitraria para lograr una transición suave y no sobre estimar en demasía los valores del número de Strickler en lechos rugosos, es decir, para inversos de rugosidades relativas mayores que 10.

El planteamiento formal, es el que se muestra a continuación:

Sea $h(x)$ la parábola:

$$h(x) = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \tag{3.8}$$

Las condiciones de borde a las que está sujeta la parábola, son las siguientes:

$$\left.\frac{dh}{dx}\right|_{x=x''} = 0 \tag{3.9}$$

$$h(x') = g(x') \quad \Rightarrow \quad a \cdot (x')^2 + b \cdot (x') + c = g(x') \tag{3.10}$$

$$h(x'') = g(10) \quad \Rightarrow \quad a \cdot (x'')^2 + b \cdot (x'') + c = g(x'') \tag{3.11}$$

Donde:

$x' = 8$ $\qquad$ $x'' = 12$ $\qquad$ $g(10) = 0.12$

Derivando la ecuación (3.8) resulta:

$$\frac{dh}{dx} = 2 \cdot a \cdot x + b \tag{3.12}$$

Luego, reemplazando la ecuación (3.12) en la ecuación (3.9), resulta:

$$b = -2 \cdot a \cdot x'' \tag{3.13}$$

Restando la ecuación (3.10) a la ecuación (3.11), resulta:

$$g(x') - g(10) = a \cdot \left((x')^2 - (x'')^2\right) + b \cdot (x' - x'') \tag{3.14}$$

Reemplazando la ecuación (3.13) en la ecuación (3.14), resulta:

$$a = \frac{g(x') - g(10)}{\left((x')^2 - (x'')^2\right) - 2 \cdot x'' \cdot (x' - x'')} \tag{3.15}$$

Donde:

$x' = 8$ $\quad$ $g(x')$ = Es un valor conocido de la parametrización lineal anterior.

$x'' = 12$ $\quad$ $g(10) = 0.12$

Con estas ecuaciones, el problema ya está resuelto, ya que una vez conocido a se reemplaza en la ecuación (3.13) y se conoce b. Finalmente para conocer c, basta con reemplazar a y b en alguna condición de borde, es decir, en las ecuaciones (3.10) o (3.11).

3.1.3 Ajuste Ayala y Oyarce

Dado que Ayala y Oyarce no obedecen a una ley logarítmica, sino más bien a una ley de potencia, sólo se ajustó en términos parabólicos, utilizando las mismas ecuaciones anteriores. La única modificación es en la ecuación (3.10), que modificada resulta:

$$h(x') = f(x') \quad \Rightarrow \quad a \cdot (x')^2 + b \cdot (x') + c = f(x') \tag{3.16}$$

Nótese que se cambió la función $g(x')$ por $f(x')$, dado que no es necesario un ajuste lineal y, por ende, sólo se suaviza mediante una parábola en las cercanías de $Rh/ds = 10$. Para esto se utilizan las mismas ecuaciones anteriores, salvo que se reemplaza la condición de borde, definida por la ecuación (3.10) por la ecuación (3.16).

3.1.4 Resumen Coeficientes Lineales y Parabólicos

En la siguiente tabla, se resumen los valores de los ajustes lineales a las parametrizaciones señaladas en la sección (3.1.1):

Tabla 3.1: Resumen de parámetros de ajustes lineales

Parametrización	k_1	k_2	$x*$	$\left.\frac{df}{dx}\right\|_{x=x*}$	b
Keulegan	2.50	12.00	5.800	-0.001504010	0.134967918
Limerinos	2.50	3.80	3.691	-0.010814549	0.228100000
Parker y Peterson	2.46	5.50	3.675	-0.007585932	0.195900000
Ayala y Oyarce	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración Propia.

En la siguiente tabla, se resumen los valores de los ajustes parabólicos a las parametrizaciones señaladas en la sección (3.1.2):

Tabla 3.2: Resumen de parámetros de ajustes parabólicos

Parametrización	a	b	c
Keulegan	0.000183490	-0.004403752	0.146422513
Limerinos	0.001348975	-0.032375411	0.314252469
Parker y Peterson	0.000950784	-0.022818811	0.256912867
Ayala y Oyarce	0.000686906	-0.016485734	0.218914406

Fuente: Elaboración Propia.

Las tablas (3.1) y (3.2) representan todos esos decimales debido a que se deja constancia de la forma de operación de MR-HR, con cuatro decimales es suficiente ya que se consigue una variación en el cuarto decimal del coeficiente de Manning, lo cual es imperceptible en la variación de alturas de escurrimiento en metros. A continuación se muestran gráficamente los ajustes tanto lineales como parabólicos realizados a todas las parametrizaciones descritas en las tablas anteriores:

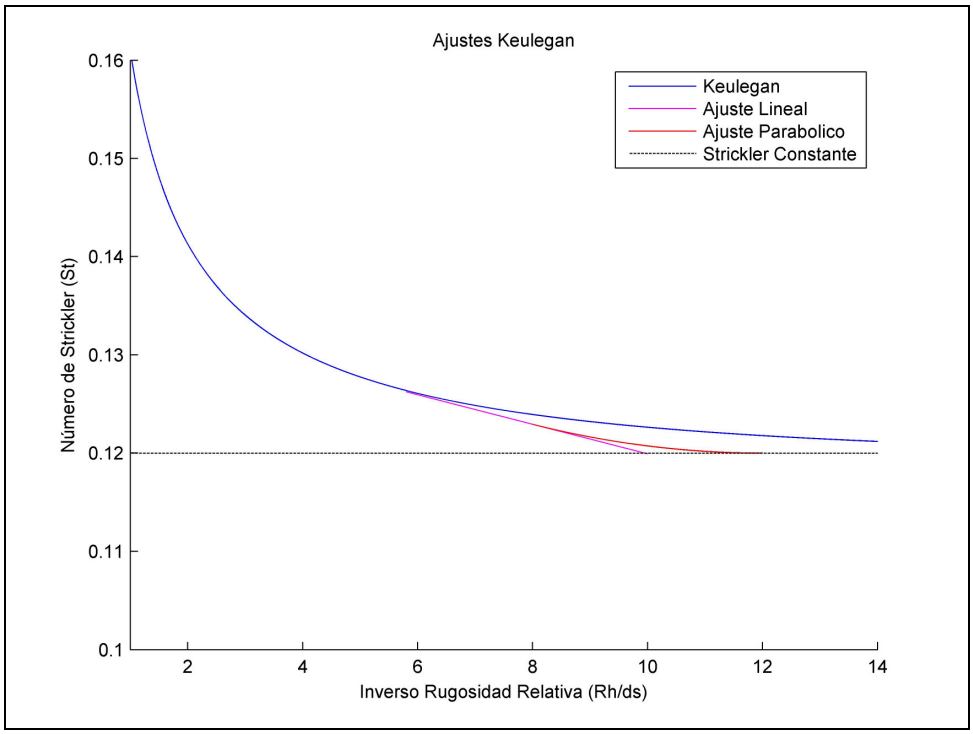


Figura 3.3: Ajustes Parametrización Keulegan
Fuente: Elaboración Propia

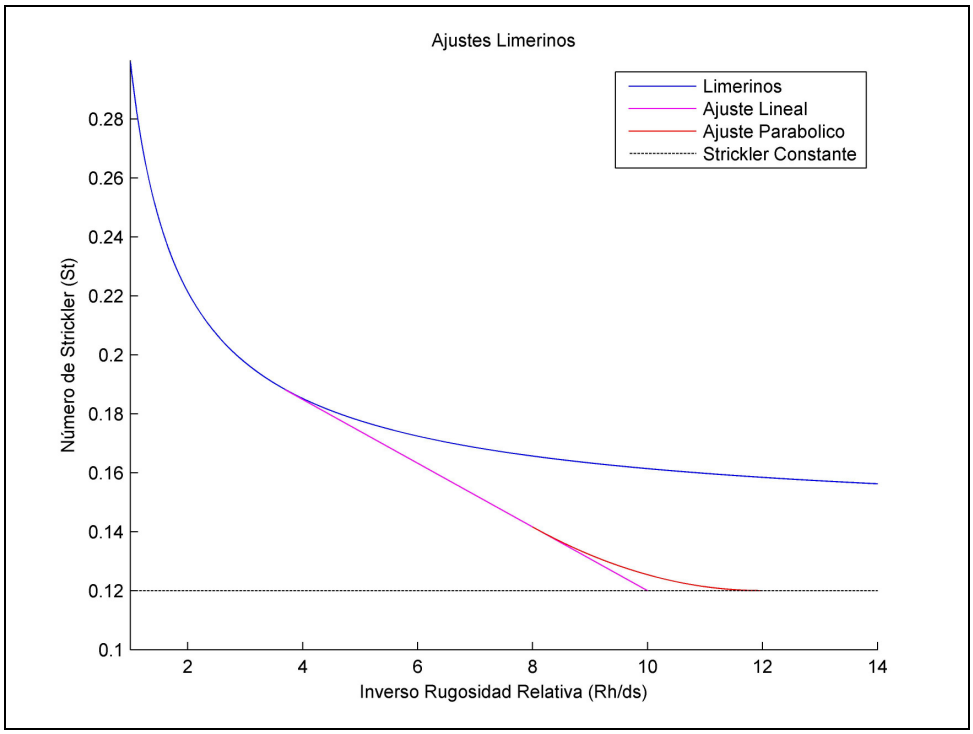


Figura 3.4: Ajustes Parametrización Limerinos
Fuente: Elaboración Propia

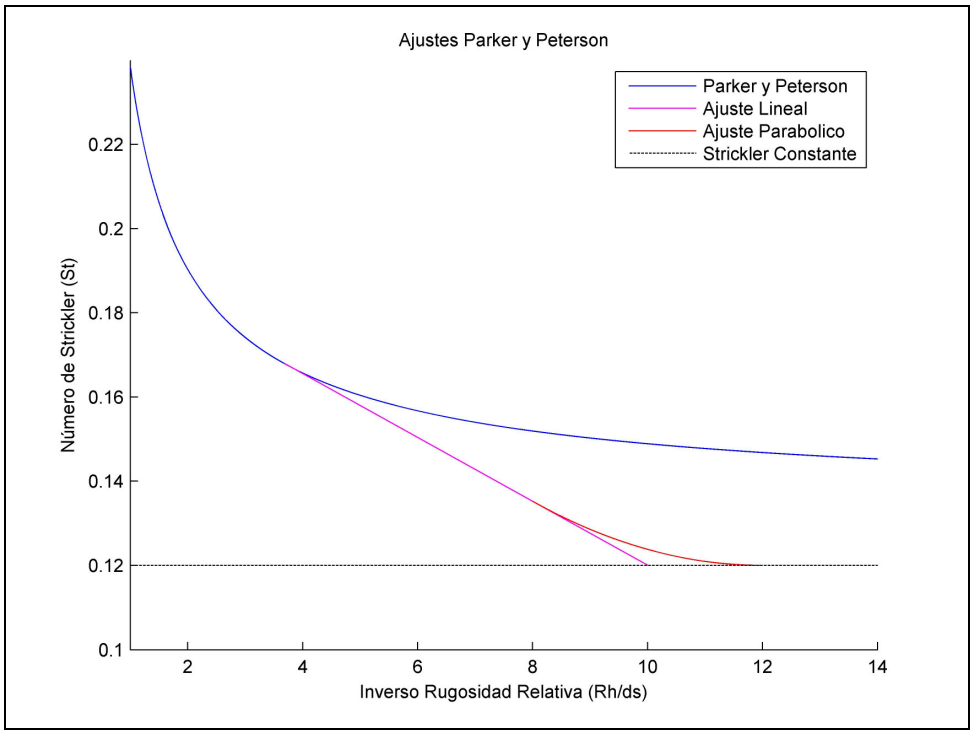


Figura 3.5: Ajustes Parametrización Parker y Peterson
Fuente: Elaboración Propia

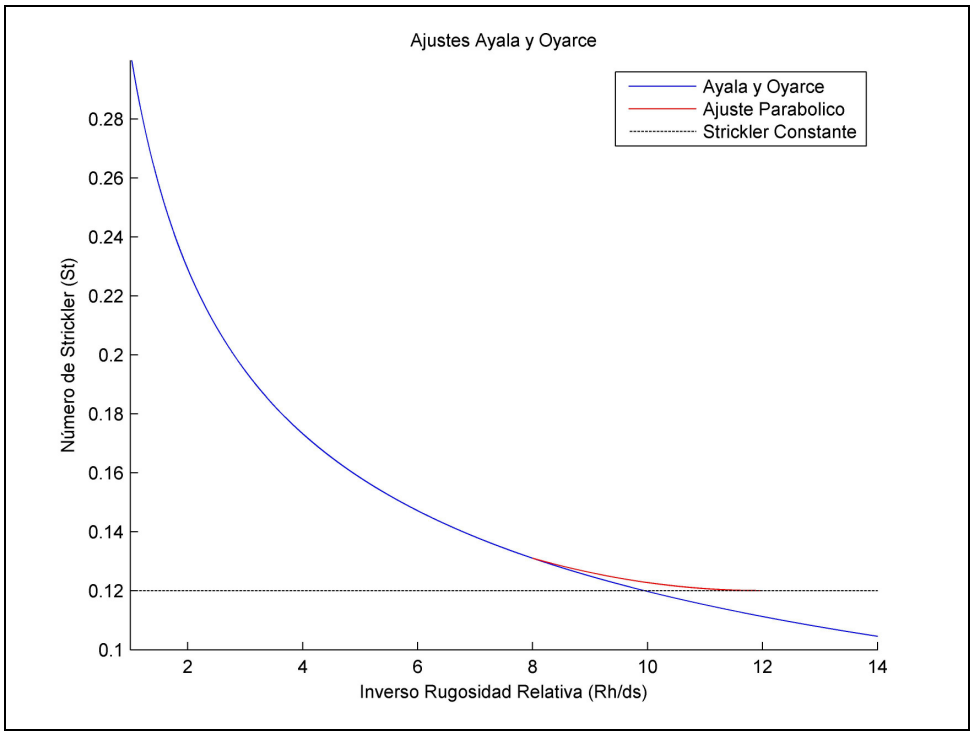


Figura 3.6: Ajustes Parametrización Ayala y Oyarce
Fuente: Elaboración Propia

3.1.5 Ajustes Inverso de Rugosidad Relativa Mínimo

Es importante destacar que las parametrizaciones de Keulegan (1938), Limerinos (1970) y Parker y Peterson (1980) obedecen a una ley logarítmica, la cual, eventualmente, podría convertirse en número negativo si el argumento del logaritmo natural es inferior a 1 (nótese que para $Rh/ds << 1$, el problema carece de sentido desde el punto de vista ingenieril). Por lo tanto, se realizó un último ajuste a las parametrizaciones y para unificar criterio, también se realizó para Ayala y Oyarce (1993), este ajuste consiste en que para todos los inversos de rugosidades relativas pertenecientes al intervalo (0,1], cada parametrización tiene un único valor constante a lo largo de todo el intervalo, el cual se obtiene de evaluar la parametrización particular en el inverso de rugosidad relativa igual a 1. En la tabla (3.3) se muestran los resultados obtenidos. El sentido de forzar el funcionamiento de las parametrizaciones fuera de su rango de validez de inversos de rugosidades relativas menores a uno, es netamente numérico, es decir, impedir que los logaritmos naturales se conviertan en números negativos por un uso inadecuado de las parametrizaciones. Por lo tanto, en estos casos los resultados entregados por el software deben ser interpretados con criterio.

Tabla 3.3: Resumen de Números de Strickler válidos para todo el intervalo de inversos de rugosidades relativas (0,1]

Parametrización	$S_t\left(\frac{R_h}{d_s}=1\right)$
Keulegan	0.160971842
Limerinos	0.299625229
Parker y Peterson	0.238454037
Ayala y Oyarce	0.303030303

Fuente: Elaboración Propia.

3.1.6 Resumen de Parametrizaciones Ajustadas

A continuación, se muestra gráficamente el resumen de parametrizaciones ajustadas, según los criterios anteriormente descritos. Es importante destacar que bajo estas parametrizaciones, la herramienta MR-HR realizará sus cálculos:

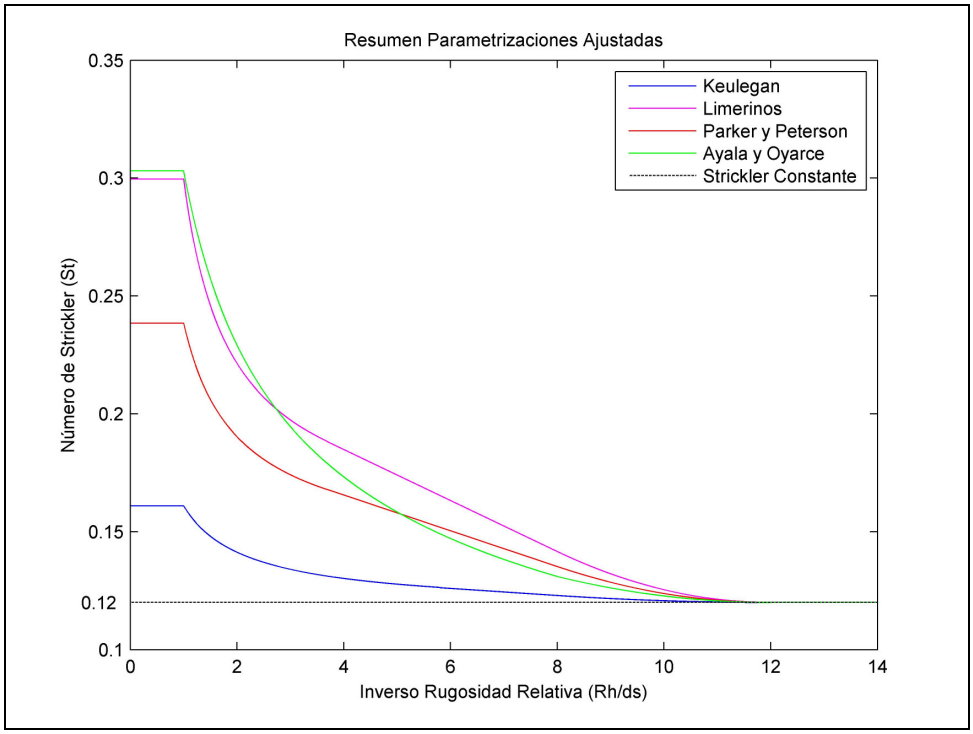


Figura 3.7: Resumen Parametrizaciones Ajustadas
Fuente: Elaboración Propia

Las parametrizaciones del número de Strickler que se observan en la figura (3.7) se obtuvieron a partir de las tablas (3.1), (3.2), (3.3) y las ecuaciones (2.17), (2.20), (2.25), (2.27).

3.2 Atributos MR-HR

En el diseño e implementación de MR-HR se pensó en un software que fuese capaz de calcular los coeficientes de Manning en escurrimientos sobre lechos macro rugosos, mediante el cálculo iterativo de números de Strickler y ejes hidráulicos. Para esto, MR-HR interactúa con HEC-RAS, dado que HEC-RAS tiene una vasta utilización en el mundo ingenieril, con un

respaldo de años de desarrollo y validación por parte de ingenieros de todo el mundo, incluido Chile. Por lo tanto, los atributos considerados en el diseño e implementación de MR-HR fueron:

- Cálculo iterativo: En base a iteraciones sucesivas del número de Strickler, MR-HR logra la convergencia de los coeficientes de Manning y, consecuentemente, el desarrollo de ejes hidráulicos.

- Parametrizaciones del Número de Strickler: como se vio en la sección (3.1.6), MR-HR incorpora diferentes parametrizaciones del número de Strickler. Esto se realizó con la finalidad de brindar un abanico de posibilidades en cuanto al cálculo de ejes hidráulicos.

- Perfiles de Flujo: Si bien, MR-HR se basa en iteraciones sucesivas del número de Strickler, también es posible realizar iteraciones en términos del caudal. Esto último se implementó con la finalidad de conseguir ejes hidráulicos para diferentes perfiles de flujo.

- Resultados Gráficos: Con la finalidad de facilitar la interpretación de los resultados brindados por MR-HR, se incorporaron diferentes opciones gráficas, las cuales pueden ser consultadas en detalle en el Anexo (A.4.5).

- Acoplamiento HEC-RAS: El acoplamiento con HEC-RAS se debe a que fue necesario un software que resolviera ejes hidráulicos para coeficientes de Manning dados.

Las opciones de selección consideras en la implementación de MR-HR, fueron las siguientes:

- Selección de Parametrización: Es posible la selección de la parametrización del número de Strickler deseada, entre las opciones presentadas en la sección (3.1.6).

- Diámetro Característico: Es posible ingresar cualquier magnitud de diámetro característico deseado, asociado a cada perfil transversal. En caso de no poseer la granulometría completa a lo largo del cauce, el programa interpolará de forma lineal.

- Número de Iteraciones: Es posible ingresar el número de iteraciones que se desee, referentes al cálculo de números de Strickler y ejes hidráulicos, para lograr la convergencia de los coeficientes de Manning.

- Rango de Caudales: Es posible ingresar cualquier rango de caudales deseado, solamente aguas arriba, para lograr diferentes perfiles de flujo y analizar los diferentes ejes hidráulicos proporcionados por MR-HR. Además, si se desea, se puede hacer funcionar MR-HR para solo un caudal aguas arriba.

3.3 Relaciones entre MR-HR y HEC-RAS

Las limitaciones existentes en HEC-RAS son íntegramente traspasadas a MR-HR, dado que éste se apoya en los cálculos brindados por HEC-RAS.

Hasta ahora sólo se ha visto que las ecuaciones expresadas en la sección (2.1) son válidas para flujos permanentes y uniformes, los cuales no son típicamente encontrados en los problemas de la ingeniería hidráulica. Por el contrario, los problemas comúnmente encontrados son flujos permanentes y gradualmente variados, es decir, la altura de escurrimiento varía paulatinamente a lo largo de los cauces. HEC-RAS aborda esta clase de problemas mediante la resolución de la ecuación de la energía, la cual es la siguiente:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 \cdot V_2^{\,2}}{2 \cdot g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 \cdot V_1^{\,2}}{2 \cdot g} + h_e \tag{3.17}$$

Donde h_e representa las pérdidas de energía tanto por efectos fricciónales como expansiones o contracciones del flujo.

$$h_e = L \cdot \overline{S_f} + C \cdot \left| \frac{a_2 \cdot V_2^{\,2}}{2 \cdot g} - \frac{a_1 \cdot V_1^{\,2}}{2 \cdot g} \right| \tag{3.18}$$

Donde $\overline{S_f}$ representa el gradiente o pendiente de fricción, el cual debe ser representativo entre las dos secciones transversales consideradas.

Para el cálculo de $\overline{S_f}$ se utiliza la ecuación de Manning (2.10). Además debe ser representativo del tramo, es decir, debe considerar las pendientes de ambas secciones transversales que conforman el tramo estudiado. Si bien la ecuación de Manning es válida para problemas con flujos uniformes y permanentes donde la pendiente de fondo es idéntica tanto a la pendiente de energía como a la pendiente de la superficie libre del agua, se considera que es localmente aplicable en escurrimientos gradualmente variados al utilizar $\overline{S_f}$ en lugar de S en la ecuación (2.10). El algoritmo de resolución que utiliza HEC-RAS es el método del paso estándar en vez del método del paso directo. El primer método obtiene una altura de escurrimiento dadas la altura de escurrimiento de la sección anterior y la distancia entre secciones. El segundo obtiene la distancia entre dos secciones en base a alturas predeterminadas. Esta implementación permite enfrentar problemas gradualmente variados en cauces no prismáticos donde varían la geometría de las secciones transversales, las pendientes de fondo, los coeficientes de Manning en el eje longitudinal, etc.

Es importante notar que en la ecuación (3.17) está expresada en forma explicita la ley de distribución hidrostática de presiones, representada por la carga piezométrica. Este supuesto es válido para pendientes menores o iguales que el 10 %.

La ampliación de flujos uniformes a gradualmente variados en canales no prismáticos tiene un impacto considerable, debido a que el primer tipo de flujo es inmensamente restrictivo, dado que no pueden variar las secciones transversales y tampoco ninguna propiedad del flujo en términos espaciales. En cambio, en el segundo tipo de flujo se admite que varíe la altura de escurrimiento y por ende, se pueden abordar problemas más generales donde cambien las velocidades, geometrías de las secciones transversales, pendientes de fondo, etc. Estos tipos de problemas son recurrentes en el quehacer cotidiano del ingeniero hidráulico.

Otro aspecto interesante de HEC-RAS es que en nodos (puntos donde confluyen o divergen 2 o más ríos) utiliza igualdad de energía. Además, y en caso que se requiera, decide cual de los

dos tramos controla mediante la aplicación de la función de momentum. El que tenga mayor momentum o fuerza específica será la condición de borde que definirá la cota de la superficie libre en el nodo. Este método es el que HEC-RAS utiliza por defecto y con el cual se trabaja en MR-HR.

3.4 Esquema de Funcionamiento

El funcionamiento de MR-HR está íntimamente ligado con HEC-RAS 4.1.0 debido a que los cálculos de ejes hidráulicos se desarrollan a través del último programa. Sin embargo, MR-HR realiza una serie de cálculos en base a los resultados de HEC-RAS, y además realiza una estructura lógica mediante la cual decide si terminar o no la ejecución.

Los pasos que realiza la herramienta son los siguientes:

1. Introduce coeficientes de Manning a todas las secciones transversales, inicialmente todos igual a 0.030 (valor propuesto en Chow (1994) para cauces naturales de granulometrías gravosas) y además prepara el primer perfil de flujo, es decir, el caudal aguas arriba para el cual se realizarán las iteraciones.

2. Calcula mediante HEC-RAS el respectivo eje hidráulico, y consecuentemente los radios hidráulicos relativos a todas las secciones transversales.

3. Gracias a los resultados del punto (2), recalcula los coeficientes de Manning, de cada sección transversal en particular, a través de la parametrización del número de Strickler seleccionada.

4. Evalúa si quedan iteraciones pendientes por realizar, previamente definidas por el usuario. Esto último es equivalente a preguntarse ¿Convergieron los coeficientes de Manning, es decir, se realizaron todas las iteraciones ingresadas, previamente, por el usuario relativas a los coeficientes de Manning?

4.1 No, entonces introduce los Coeficientes de Manning recalculados y vuelve a iterar desde el punto (2).

4.2 Sí, entonces evalúa ¿Quedan perfiles restantes, es decir, otros caudales para los cuales el usuario quiera calcular nuevamente los ejes hidráulicos?.

4.2.1. No, entonces fin de la ejecución.

4.2.2. Sí, entonces vuelve al punto (1) con el nuevo perfil y realiza todos los pasos.

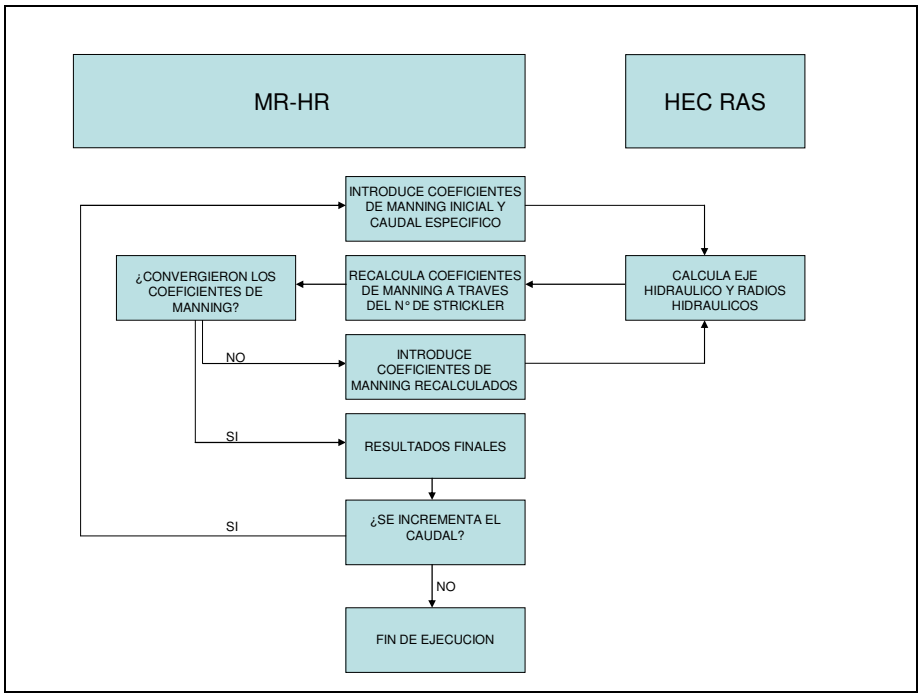


Figura 3.8: Esquema de Funcionamiento MR-HR.
Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, es posible apreciar todos los pasos anteriormente descritos, resumidos en la figura (3.8).

3.5 Resultados Proporcionados

El principal aporte de MR-HR es que extiende la aplicación de la ecuación de Manning a un rango para el cual no fue deducida, pero que se utiliza dada la ausencia de un método de cálculo. Este aporte lo refleja mediante el cálculo de coeficientes de Manning, a través de las

diferentes parametrizaciones del número de Strickler. En la figura (3.9) se aprecia la ventana principal del programa.

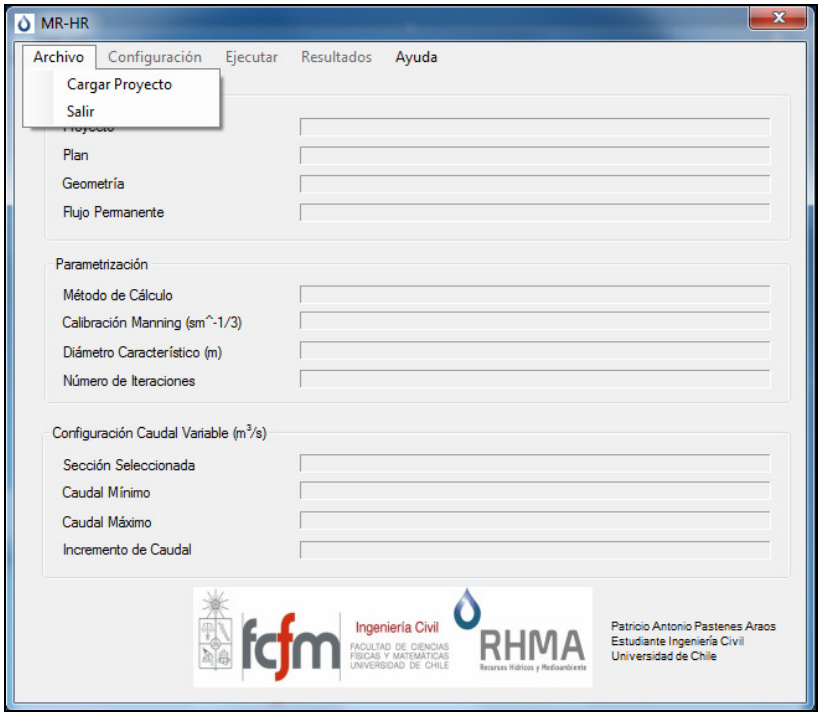


Figura 3.9: Ventana Principal MR-HR.
Fuente: Elaboración Propia.

En el capítulo Anexo (A.4.5) se muestra la forma en que se presentan los resultados MR-HR y además, las representaciones gráficas que la herramienta proporciona.

Capítulo 4. Aplicación al río Baker.

En el presente capítulo se desarrolló una aplicación, a través de la herramienta MR-HR, a un tramo del Río Baker, ubicado en la XI región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo.

En una primera etapa se presentan antecedentes generales del río Baker y su cuenca, basados en su totalidad en el Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico Aysén (Centrales Hidroeléctricas de Aysén S.A., 2008). Luego se describe un tramo del río Baker, que fue considerado para la ejecución de MR-HR junto con su caracterización granulométrica. Esto último se materializó basado en un estudio realizado para HidroAysén por el Grupo de Investigación en Procesos de Transporte y Flujos Ambientales de la Universidad de Chile (Universidad de Chile, 2010). Finalmente, se tomaron diversos caudales de interés para la realización de pruebas con MR-HR.

Es importante destacar que el presente capítulo no tiene como objetivo definir que parametrización es mejor para el río Baker, ni tampoco ahondar en los aspectos particulares del escurrimiento en el río, sino que el objetivo principal es la implementación de la herramienta computacional aquí diseñada a un caso real. Es por esto que la aplicación, aquí desarrollada, está orientada a ver las diferencias en los ejes hidráulicos calculados usando las diferentes parametrizaciones del número de Strickler.

4.1 Antecedentes Generales Río Baker

El Río Baker drena una superficie de 26.487 km^2, de los cuales 17.159 km^2 están en territorio nacional. Su caudal medio está entre 1.200 y 1.100 m^3/s, siendo el río más caudaloso del país. Tiene su origen en el lago Bertrand, ubicado en la cota 203 m.s.n.m., que se encuentra aguas abajo del lago General Carrera, cuerpo lacustre de 1.047,5 km^2, el más extenso del país y de carácter internacional, llamado Buenos Aires en el lado argentino. Los principales ríos aportantes al lago General Carrera son: río Ibáñez, río Avellanos, río Murta, río Delta o Leones y río Jeinemeni, todos de orden 4 a excepción del río Ibáñez que es de orden de jerarquía 5.

En su recorrido de 175 km hasta desembocar en las inmediaciones de Tortel, el río Baker recibe numerosos e importantes afluentes tales como: Chacabuco, Cochrane, Del Salto y De Los Ñadis por el oriente; Nef, De La Colonia y Ventisquero por el occidente.

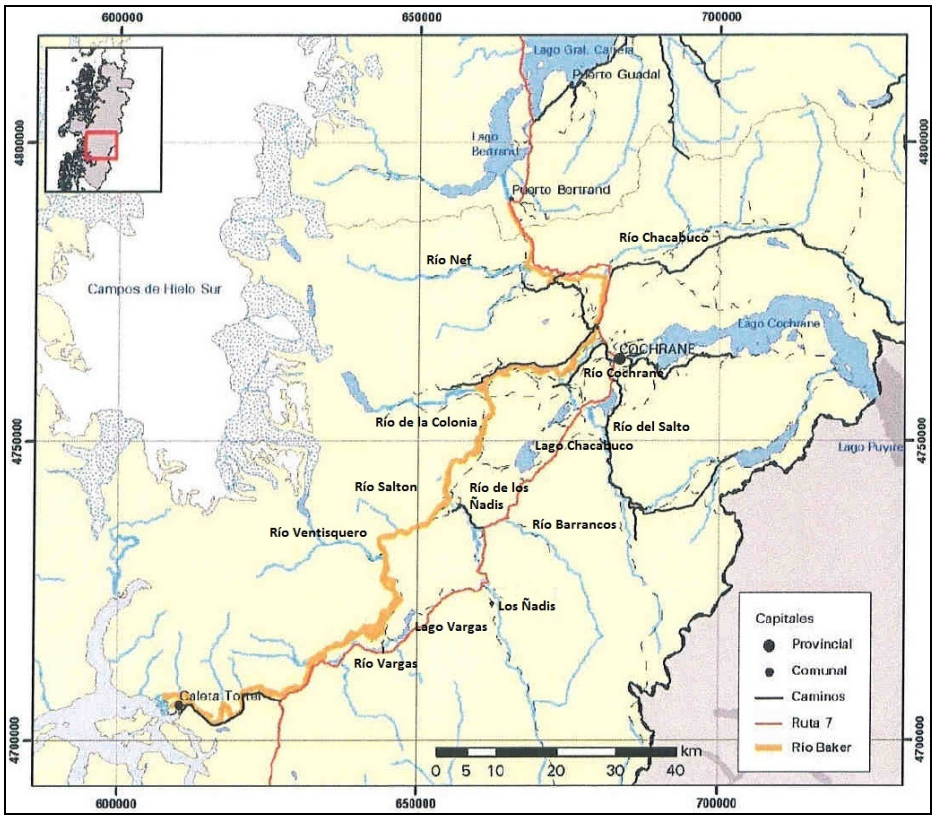


Figura 4.1: Red de Drenaje Subcuenca del Río Baker.
Fuente: Centrales Hidroeléctricas de Aysén S.A. (2008)

Las precipitaciones en la región de Aysén aumentan en forma considerable de este a oeste. En Chile Chico, en el límite con Argentina, la precipitación media anual es del orden de 240 mm, en Puerto Gaudal de 790 mm y en Puerto Bertrand, en el desagüe del lago, de 1330 mm.

El régimen del río Baker es nivo-pluvial con flujos máximos en épocas de deshielo. En su nacimiento, el río Baker es muy uniforme debido al efecto regulador del lago General Carrera y presenta aguas cristalinas debido al efecto decantador del mismo lago. Los primeros afluentes son los ríos Nef y Chacabuco, que generan un aumento en la turbiedad sobretodo por los aportes del Río de la Colonia que, por provenir directamente del derretimiento de nieve y hielos de los

glaciares de Campo de Hielo Norte, presentan un gran arrastre de sólidos suspendidos y de arrastre de fondo.

En general se distinguen 3 tipos de zonas morfológicas en el río Baker, las cuales son:

- Zonas tipo cascada: se presentan situaciones aguas arriba de la confluencia del el río Nef con el río baker, aguas arriba de la junta entre los ríos Baker y Chacabuco y aguas arriba de la futura central Baker 2, la cual estará emplazada en la angostura El Saltón a unos 2 km aguas arriba de la confluencia de los ríos Baker y El Saltón. Este tipo de forma se caracteriza por alta pendiente de terreno, sustrato grueso tipo rocas que obstruyen el escurrimiento formando zonas de aguas blancas.

- Regiones con canal recto con ausencia de rápidos y remansos: se ubica principalmente aguas abajo de la confluencia entre los ríos Baker y Chacabuco y algunos sitios intermedios. Esta región presenta una variabilidad importante en las condiciones del escurrimiento en el eje longitudinal, dando origen a sectores de altas velocidades (rápidos ubicados aguas abajo de secciones con escurrimientos crítico) y zonas de bajas velocidades ubicadas aguas arriba de la sección crítica (remansos).

- Tramos trenzados: esta clase de escurrimiento se presenta en amplias regiones del río Baker y sus afluentes, y se generan por la disminución de la pendiente de terreno, hecho que favorece el desarrollo lateral, permitiendo así la existencia de más de un brazo del río. Además, dados los procesos de erosión de las riberas de los cauces, la variabilidad temporal de la forma del cauce es amplia, resultando que el trenzado del río varía de forma en el transcurso de un año. Desde el punto de vista hidráulico, el régimen en estas zonas es subcrítico (río), caracterizado por bajas velocidades y altas alturas de escurrimiento. Este tipo de escurrimiento se verifica en el tramo del río Baker comprendido desde 8 Km. aguas arriba de la confluencia del río Del Salto hasta dos kilómetros aguas abajo de la confluencia con el río De Los Ñadis.

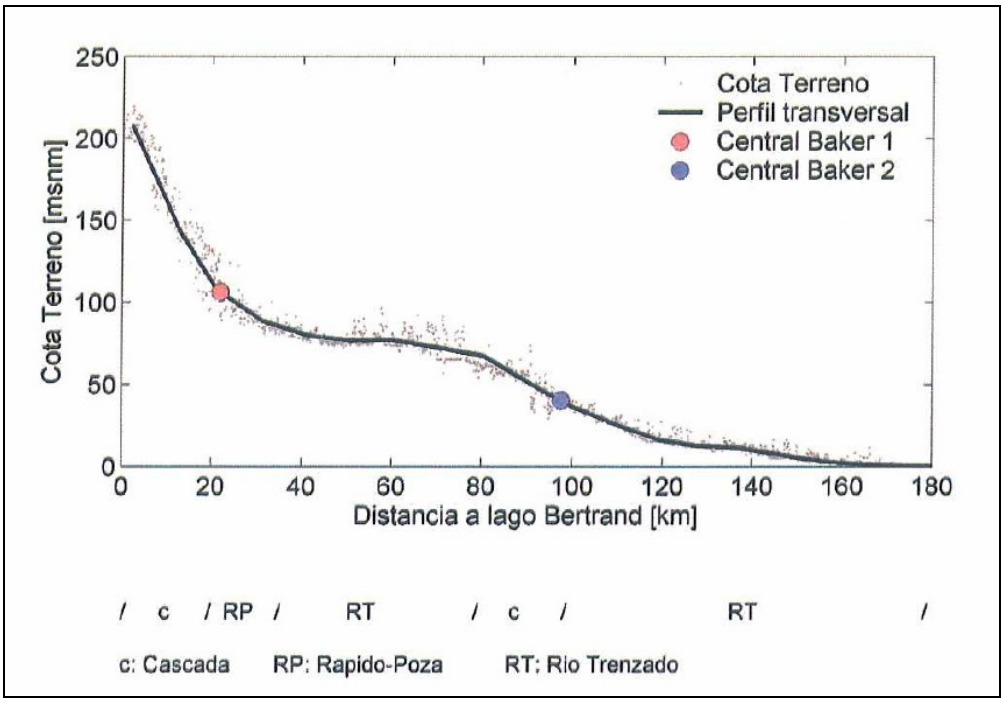


Figura 4.2: Ubicación de las Centrales Baker 1 y 2 en el Eje Longitudinal y la Distribución Longitudinal de los Tipos Morfológicos Presentes en el Río Baker.
Fuente: CEA (2006) citado en Centrales Hidroeléctricas de Aysén S.A. (2008)

4.2 Tramo Particular Estudiado

La aplicación se desarrolló en el río Baker aguas abajo del futuro emplazamiento de Baker 1 (central hidroeléctrica que construirá HidroAysén), hasta su desembocadura en caleta Tortel. Este tramo tiene una longitud de 148 km y está caracterizado por 740 perfiles transversales, los cuales se detallan en el Anexo (B.3). En la figura (4.3) se puede apreciar el tramo particular estudiado.

La central hidroeléctrica Baker 1 estará emplazada en la angostura Chacabuco, a unos 1000 m aguas arriba de la confluencia entre los ríos Baker y Chacabuco. Baker 2 estará emplazada en la angostura El Saltón, unos 2 km aguas arriba de la confluencia de los ríos baker y El Saltón.

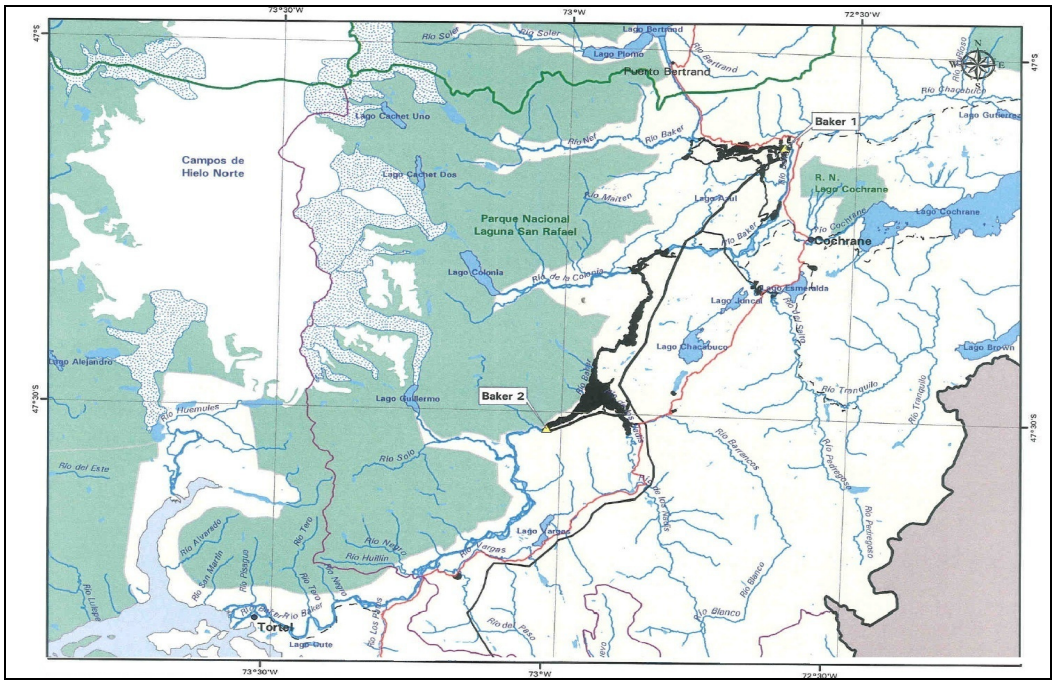


Figura 4.3 : Tramo Estudiado en la Presente Aplicación.
Fuente: Centrales Hidroeléctricas de Aysén S.A. (2008)

Notar que la figura (4.3) es referencial dado que ninguna de las dos centrales ha sido construida y las superficies de inundación, marcadas en negro, son las superficies estimadas que tendrán ambas centrales. Por lo tanto, para efectos de la aplicación de MR-HR no existen zonas de inundación, y sólo se considera el cauce natural desde Baker 1 a la desembocadura en caleta Tortel.

4.3 Caracterización Granulométrica

El trabajo realizado por Universidad de Chile (2010) consistió en mejorar la caracterización de la granulometría de los ríos Baker y Pascua. Para esto, se realizaron 5 visitas a terreno comprendidas entre los años 2006 al 2010. Los sitios muestreados se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 4.1: Ubicación de Lugares de Muestreos Granulométricos, Río Baker.

Sitio	Ubicación	Tipo de muestreo	Coordenadas UTM (Datum WGS84)	
			N	E
SLB1	Río Baker en islote bajo sector desagüe L. Bertrand	Integral	4.788.440	665.288
SLB2	Río Baker en tramo Bertrand - Nef	Integral	4.785.155	667.109
SLB3	Río Baker antes junta Río Nef	Integral	4.779.055	667.877
LB-S1	Río Baker bajo Angostura Chacabuco	Integral	4.777.528	673.999
LB-S2	Río Baker en sector Balsa Baker	Integral	4.769.355	679.328
RB2A	Río Baker en isla sector Valle Grande	Integral	4.762.407	665.091
RB2B	Río Baker bajo junta Río de la Colonia	Superficial	4.749.013	659.955
RB2C	Río Baker antes junta Río de Los Ñadis	Superficial	4.743.142	654.808
LB-S4	Río Baker bajo junta Vargas	Integral	4.713.594	634.305

Fuente: Universidad de Chile (2010)

El muestreo superficial corresponde a la granulometría de la coraza del lecho, mientras que el muestro integral representa la granulometría integral del lecho sin incluir su coraza. Sólo deben considerarse de la tabla (4.1) los sitios: LB-S1, LB-S2, RB2A, RB2B, RB2C, LB-S4, debido a que estas ubicaciones se encuentran aguas abajo de la futura central hidroeléctrica Baker 1 (angostura Chacabuco). A continuación se muestran los esquemas de ubicación de dichos sitios.

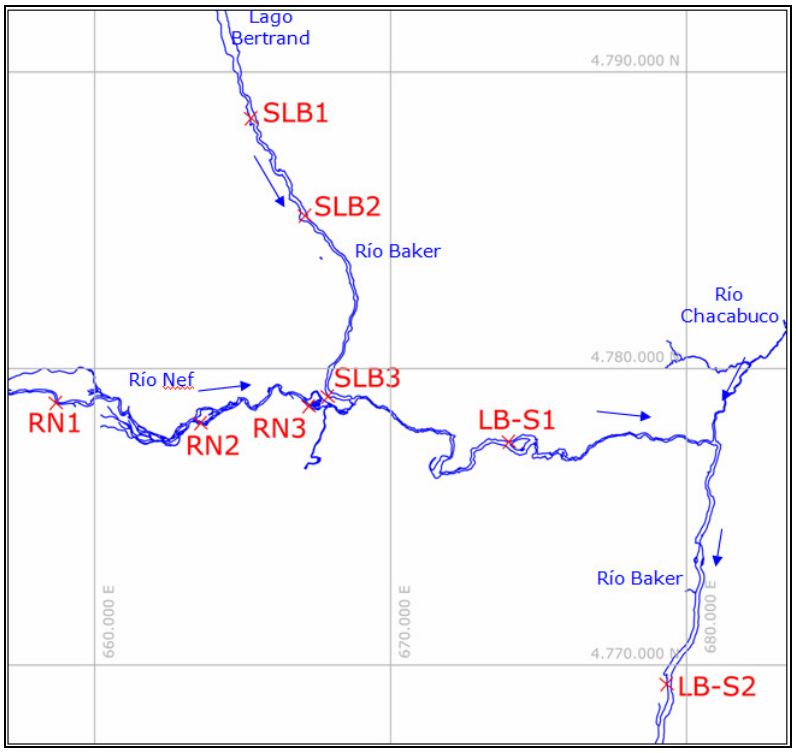


Figura 4.4: Esquema de ubicación de calicatas Río Baker (inicio) y Río Nef.
Fuente: Universidad de Chile (2010)

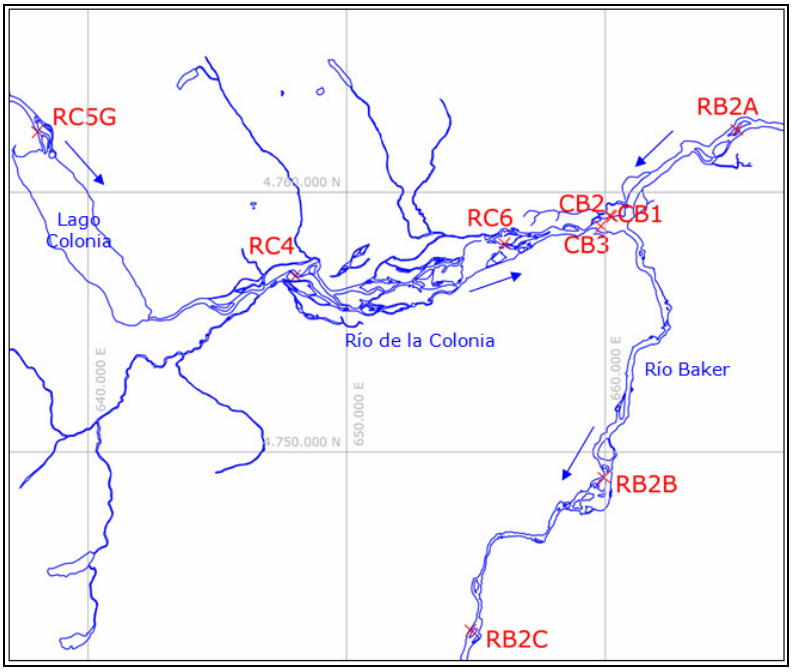


Figura 4.5: Esquema de ubicación de calicatas Río Baker (Valle Grande) y Río de la Colonia.
Fuente: Universidad de Chile (2010)

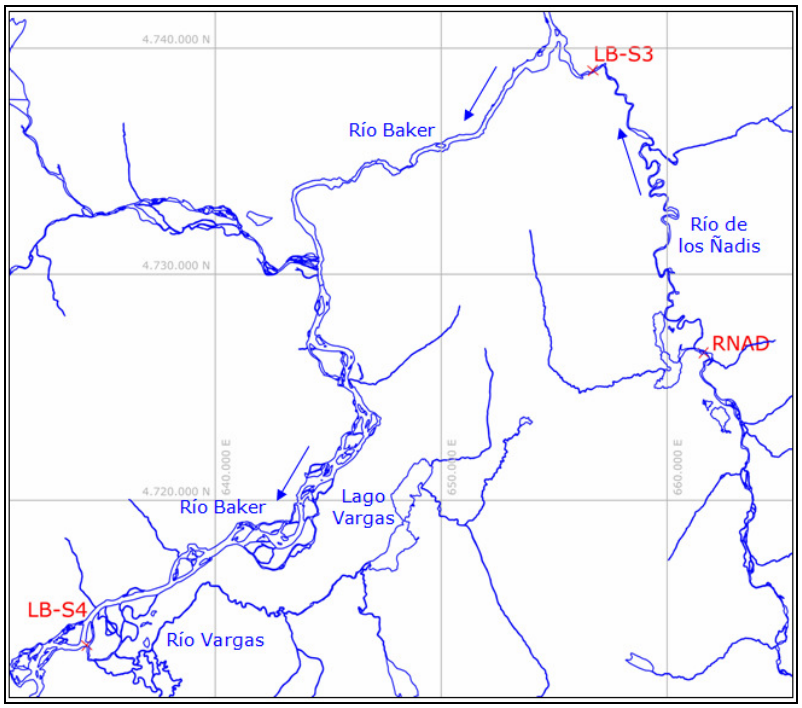


Figura 4.6: Esquema de ubicación de calicatas Río Baker (bajo Ñadis hasta Río Vargas) y Río de los Ñadis.
Fuente: Universidad de Chile (2010)

Las campañas de muestreo asociadas a los distintos sitios, se muestran a continuación:

Tabla 4.2: Campañas de terreno de muestreo granulométrico.

Fechas	Sitios muestreados
21-25 Nov. 2006	LB-S2, LB-S3, LB-S4, LB-S5
19-21 Ene. 2007	LB-S1, CB1, CB2, CB3
12-14 Nov. 2009	RB2A, RB2B, RB2C, RNAD, RC4, RC5G, RC6, RN1, RN2, RN3
16-17 Dic. 2009	SLB1, SLB2, SLB2
13-15 Feb. 2010	RP1, RP2, RP3, RP3a, RP4, RP5, RP6, RP7, RP8

Fuente: Universidad de Chile (2010)

Finalmente, los resultados que proporcionó el trabajo granulométrico fueron:

Tabla 4.3: Tamaños característicos del sustrato, Río Baker (mm).

	SLB1	SLB2	SLB3	LB-S1	LB-S2	RB2A	LB-S4
D_{90}	131.2	20.1	62.3	72.3	45.0	22.2	18.4
D_{84}	116.4	12.7	51.0	57.1	36.2	17.5	13.0
D_{50}	22.3	1.0	18.1	9.8	15.4	5.1	3.9
D_{16}	2.1	0.2	0.6	0.4	1.7	0.4	0.7

Fuente: Universidad de Chile (2010)

En la tabla (4.3) se excluyen los resultados de los sitios RB2B y RB2C debido a que en la confección de esa tabla se buscaba caracterizar el sustrato y esos puntos fueron muestreados superficialmente. Sin embargo, también es posible agregar información granulométrica de la coraza, en particular el diámetro característico medio de la coraza ya que es válido ligar éste con el diámetro característico 90% y 84% de la granulometría integral del lecho. En este análisis, en particular, no se incluyeron dichos sitios de muestreo, pero se podrían haber incluido sin problema. A continuación se adjunta la curva que representa la variación longitudinal del sedimento del sustrato en el Río Baker.

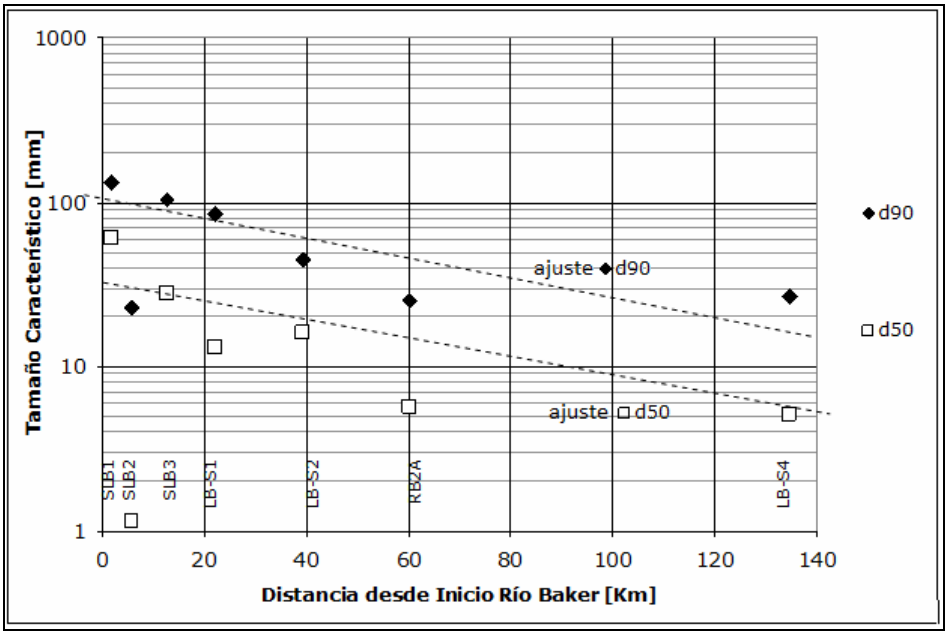


Figura 4.7: Variación longitudinal de los tamaños característicos de los sedimentos del lecho del Río Baker (Sustrato)
Fuente: Universidad de Chile (2010)

De la figura (4.7) se deben extraer los datos representativos del cauce natural particular estudiado, es decir, dado que el tramo particular en estudio nace aguas abajo de la angostura Chacabuco, sólo se consideran los muestreos desde LB-S1 en adelante, o en forma equivalente, desde los 20 km en adelante. Además es posible observar un cambio de tendencia en la distribución de los sedimentos gruesos D_{90}, debido a que en la estaciones LB-S1, LB-S2 y RB2A se observa una tendencia decreciente y luego, entre las estaciones RB2A y LB-S4, se observa una tendencia casi constante.

Para efectos del análisis en MR-HR, se necesitan los diámetros característicos D_{90} y D_{84}. En un primer análisis se consideró sólo un diámetro característico para todo el cauce estudiado. De esta forma, la macro rugosidad varió en función del desarrollo del eje hidráulico. Luego, se compararon los resultados en la forma más general posible, es decir, se consideró la variación de los diámetros característicos del lecho a lo largo del cauce junto con el efecto del desarrollo del eje hidráulico en la macro rugosidad versus proponer un sólo coeficiente de Manning para todo el cauce, basado en el diámetro característico representativo de todo el cauce calculado en la etapa anterior.

En la primera etapa, se planteó la siguiente metodología para definir el diámetro característico representativo de todo el cauce:

1. Se realizó un ajuste lineal entre los puntos de muestreo LB-S1 y RB2A, es decir, desde el km. 20 al km. 60 según la figura (4.7). Con esto se obtuvo una representación lineal de la distribución de los sedimentos entre dichos puntos.

2. Se realizó otro ajuste lineal entre los puntos de muestreo RB2A y LB-S4, es decir, desde el km. 60 al km. 140 según la figura (4.7). Con esto se obtuvo otra representación lineal de la distribución de los sedimentos entre dichos puntos.

3. Con esto se procedió a calcular el valor representativo del sedimento, mediante el valor medio ponderado (VMP):

$$D_{S\,(VMP)} = \frac{\int_{20}^{60} y(x)\cdot dx + \int_{60}^{140} y'(x)\cdot dx}{\int_{20}^{140} dx} \tag{4.1}$$

Donde:

$y(x)$: representa la parametrización lineal de la distribución de sedimentos, entre las estaciones LB-S1 y RB2A. Es función de x dado que varía a lo largo del eje longitudinal. (mm)

$y'(x)$: representa la parametrización lineal de la distribución de sedimentos, entre las estaciones RB2A y LB-S4. Es función de x dado que varía a lo largo del eje longitudinal. (mm)

x : representa el eje longitudinal, es decir, la distancia. (km)

A continuación se muestra el resumen de cálculos realizados para la obtención de la caracterización granulométrica.

Tabla 4.4: Coeficientes de Correlación D_{90} (del sustrato), Río Baker.

Rectas: $c_1 \cdot x + c_2$			
Recta	c_1	c_2	R^2
$y(x)$	-1.2525	96.6	0.9974
$y'(x)$	-0.0487	25.1231	1.0

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.5: Coeficientes de Correlación D_{84} (del sustrato), Río Baker.

Rectas: $c_1 \cdot x + c_2$			
Recta	c_1	c_2	R^2
$y(x)$	-0.99	76.5333	0.9990
$y'(x)$	-0.0577	20.9615	1.0

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.6: Resumen de Valores Medios Ponderados (VMP), Río Baker.

Diámetro Característico	VMP [mm]
D_{90}	29.0
D_{84}	22.4

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, se muestra en forma gráfica los resultados de las tablas (4.4), (4.5) y (4.6).

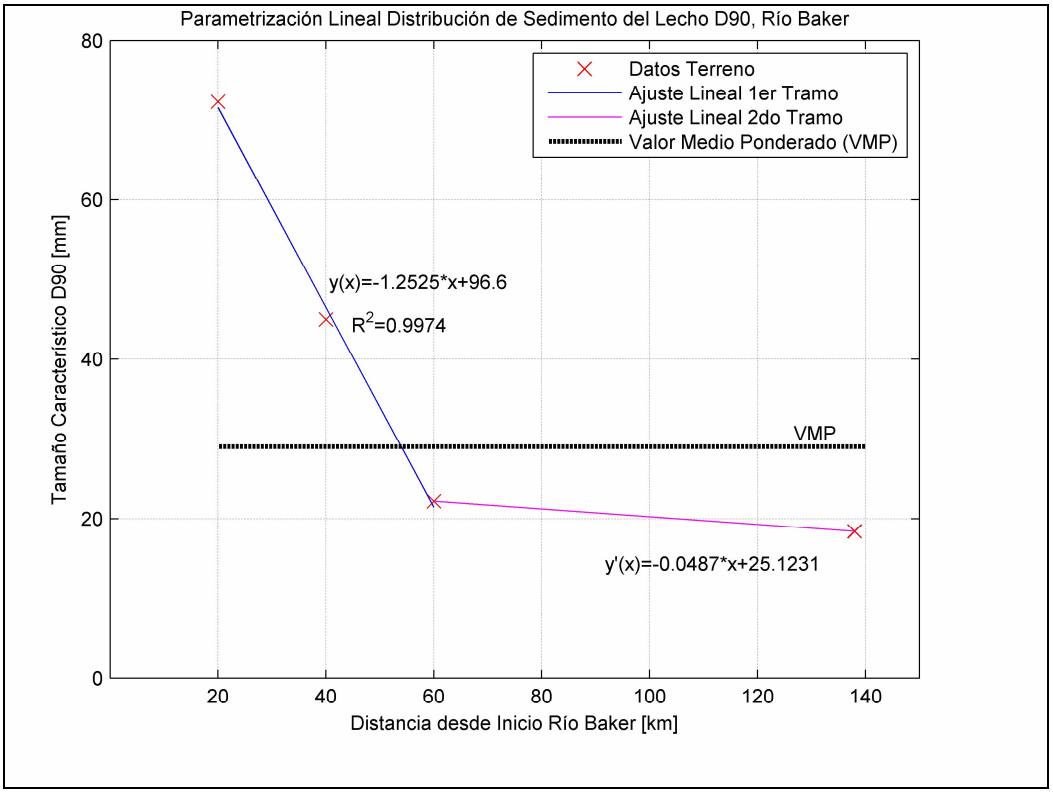


Figura 4.8: Parametrización lineal de la variación longitudinal de los tamaños característicos de los sedimentos del lecho del Río Baker (Sustrato D_{90})
Fuente: Elaboración Propia

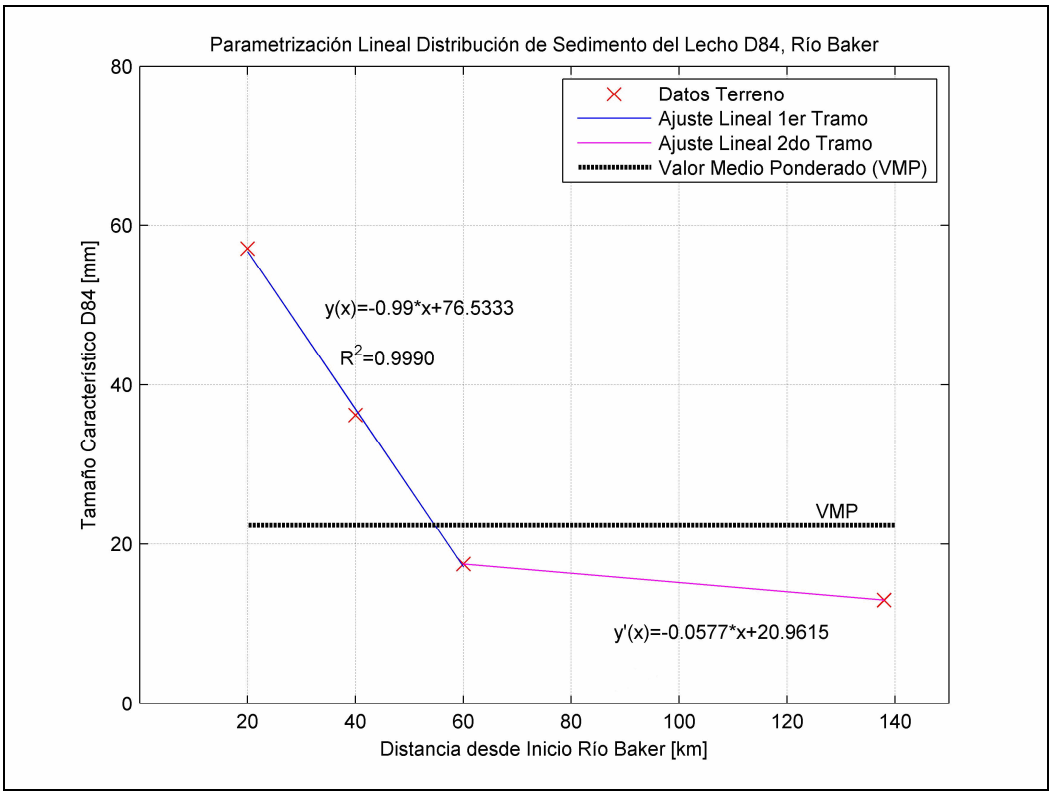


Figura 4.9: Parametrización lineal de la variación longitudinal de los tamaños característicos de los sedimentos del lecho del Río Baker (Sustrato D_{84})
Fuente: Elaboración Propia

4.4 Cálculo de Ejes Hidráulicos Mediante MR-HR

Para el cálculo de ejes hidráulicos mediante MR-HR en una primera etapa, se definió un rango de caudales entre [1 - 50] m^3/s, con un paso de 1 m^3/s. Además, se seleccionaron los diámetros característicos:

- Valor Medio Ponderado (VMP)
- Valor Mínimo
- Valor Máximo

La selección de estos diámetros se debe a que es posible obtener un eje hidráulico medio, a través del valor medio ponderado (VMP), y además obtener un eje hidráulico máximo y otro mínimo, representados por los diámetros característicos máximo y mínimo respectivamente.

La siguiente tabla resume los valores de los diámetros característicos anteriormente señalados:

Tabla 4.7: Resumen de diámetros característicos considerados

Valor Considerado	D_{90} [mm]	D_{84} [mm]
Valor Mínimo	18.4	13.0
Valor Medio Ponderado (VMP)	29.0	22.4
Valor Máximo	72.3	57.1

Fuente: Elaboración Propia

Para definir una métrica de cuál es el diámetro característico que genera mayor macro rugosidad, se empleó el concepto de número de Strickler promedio de todo el cauce, para un determinado caudal:

$$St_{promedio} = \frac{\sum_{i=1}^{740} St_{(i,q)}}{740} \tag{4.2}$$

Donde:

$St_{(i,q)}$: representa el número de Strickler, para una parametrización particular, de la sección transversal i-ésima y para el caudal q-ésimo.

La ecuación (4.2) es interesante desde el punto de vista de poder seleccionar el diámetro característico que genere un mayor grado de macro rugosidad, representado por el número de Strickler promedio de todo el cauce para un determinado caudal, para poder centralizar el análisis en ese diámetro. Además esta manera de cuantificar la macro rugosidad permite ver la evolución de ésta en función del caudal. Con esto último, también se podrá centrar la atención en los caudales que generen mayor macro rugosidad.

La importancia de focalizar el análisis en las macro rugosidades más elevadas recae en que si se generan muchos sectores con lechos rugosos, pierde un poco de sentido el uso de MR-HR,

debido a que no se necesitará realizar iteraciones en esas zonas pues el valor del número de Strickler es constante.

Entonces se ejecutó este problema, adjunto en Anexo (B.3), en MR-HR para todas las parametrizaciones del número de Strickler, considerando los valores de diámetros característicos indicados en la tabla (4.7) y con un rango de caudales [1 - 50] m^3/s, con un paso de 1 m^3/s. Los resultados completos se adjuntan en el Anexo (B.5). En este trabajo se presentan los resultados resumidos mediante figuras.

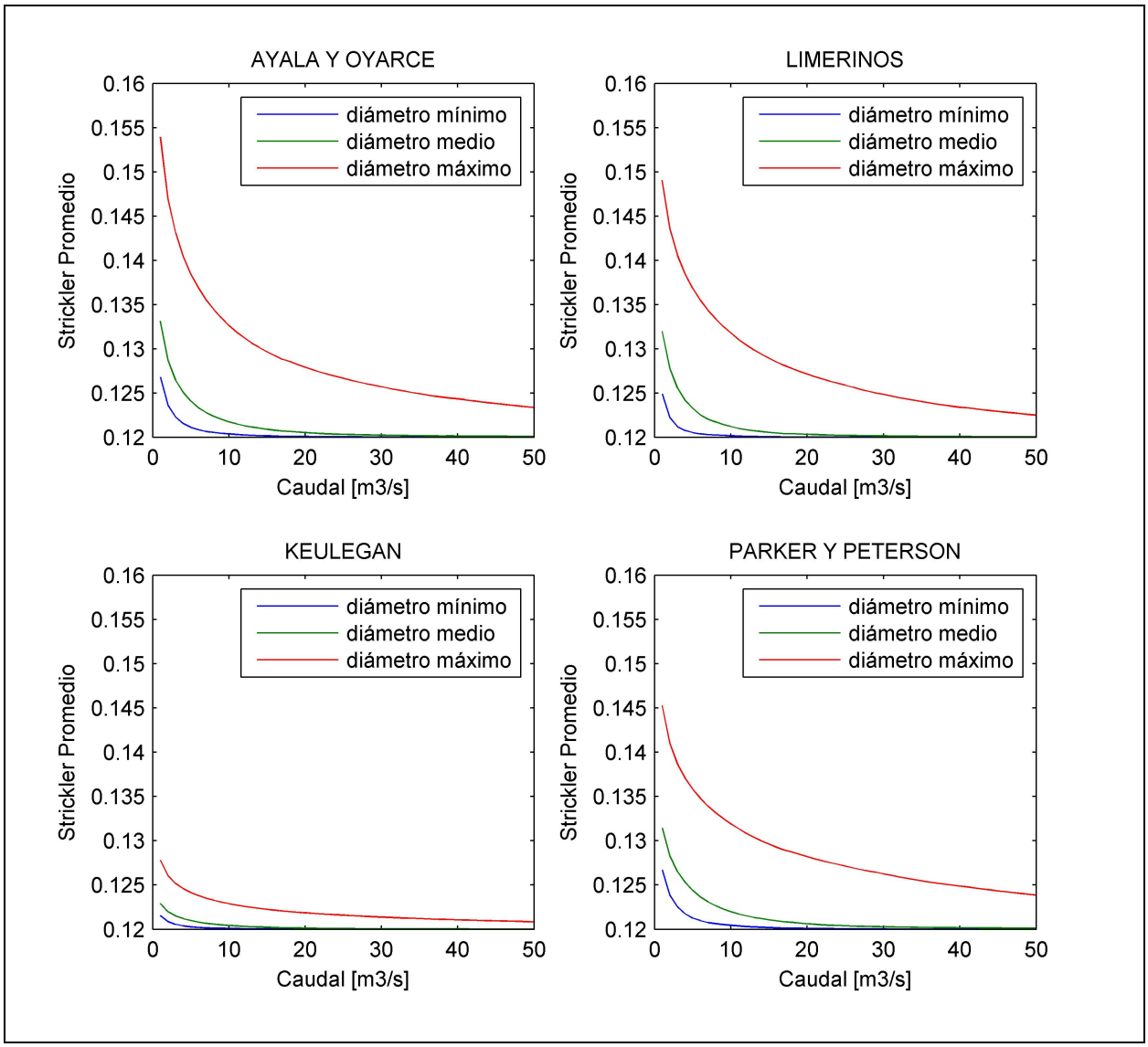


Figura 4.10: Variación del Strickler promedio vs. caudal, para diferentes diámetros.
Fuente: Elaboración Propia

De la figura (4.10) se aprecia el correcto funcionamiento de MR-HR ya que para todas las parametrizaciones, el diámetro característico máximo es que el produce mayor macro rugosidad. Esto se debe a que el inverso de la rugosidad relativa es menor para diámetros más grandes, lo que implica números de Strickler mayores. Además se aprecia que para caudales menores el número de Strickler promedio es mayor, esto se debe a que a menor caudal disminuyen las alturas de escurrimiento y, consecuentemente, los radios hidráulicos, lo que implica que disminuya el inverso de la rugosidad relativa.

Por otra parte, se aprecia para diámetros característicos mínimos y medios que pasado el umbral de 30 m^3/s el Strickler promedio vale 0.12. Esto indica que bajo dichas condiciones los problemas son de lecho rugoso, por lo que no se consideraron en este análisis.

Por lo tanto, la aplicación se centra en el rango de caudales [1-50] m^3/s y utilizando el diámetro característico máximo. En particular, se escogió el caudal 5 m^3/s y se graficaron los ejes hidráulicos brindados por las diferentes parametrizaciones, lo cual se muestra en la figura (4.11). Vale la pena destacar de esta figura, que los ejes hidráulicos calculados mediante las distintas parametrizaciones aparentan ser iguales entre si, pero no lo son. Esta distorsión ocurre porque para este caso en particular, los ejes hidráulicos difieren en un orden de magnitud de centímetros y la escala de la figura (4.11) es demasiado grande para apreciar estas diferencias[4]. Entonces, no habría motivo para pensar que pudiesen presentarse diferencias apreciables en esta escala para caudales mayores, dado que la figura (4.10) muestra que en general el lecho tiende a tornarse rugoso, es decir, deja de ser macro rugoso para valores de números de Strickler iguales a 0.12, a medida que se incrementa el caudal. Para solucionar el tema de escalas, se recurre a realizar el análisis a secciones transversales particulares, donde se maximicen las diferencias de alturas de escurrimiento y a una escala apreciable visualmente. Además es de especial interés seleccionar un par de secciones transversales que representen tanto rápidos como pozas, lo cual es determinado por el número de Froude. Con esta comparación se podrá apreciar las variaciones entre las diferentes parametrizaciones.

[4] Para consultar en detalle los resultados computados por MR-HR, véase el Anexo (B.5), el cual representa los resultados completos de la presente aplicación.

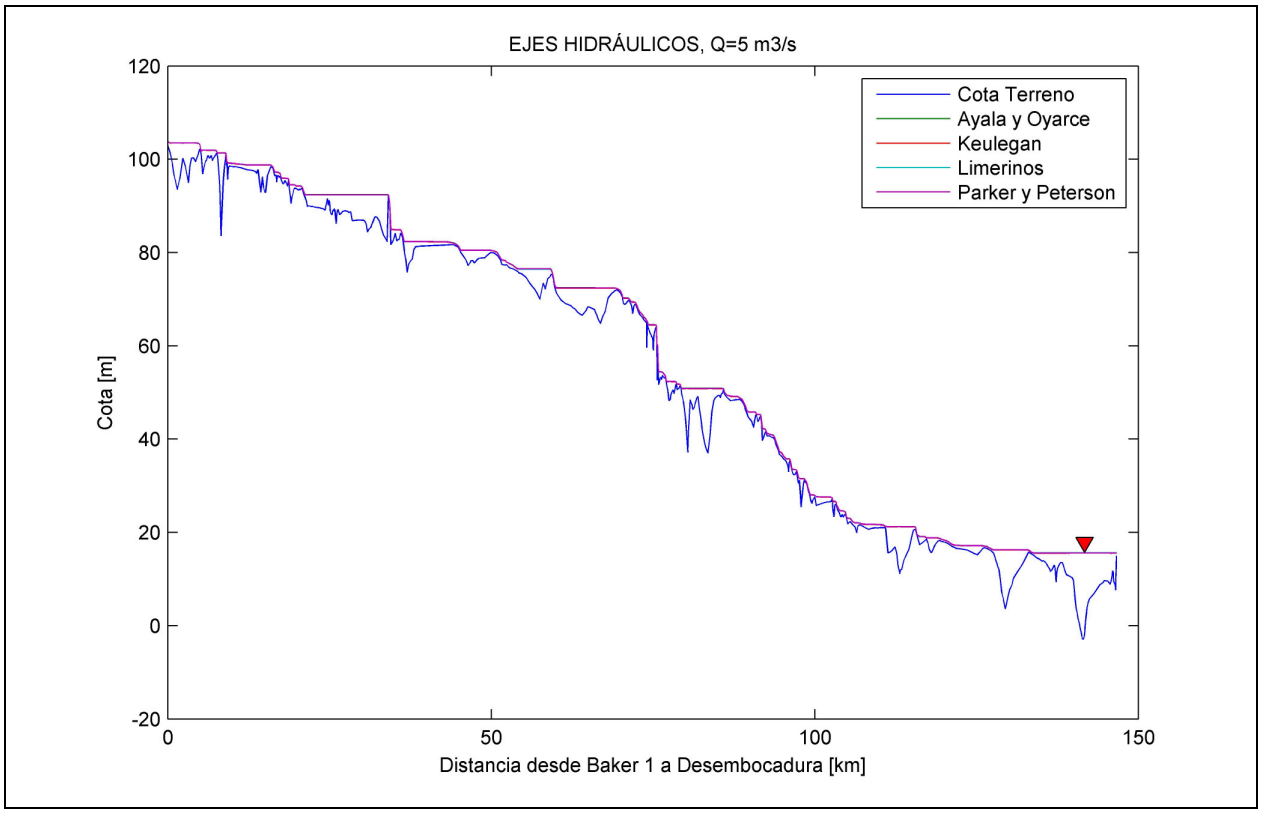


Figura 4.11: Resultados MR-HR: Ejes hidráulicos considerando diferentes parametrizaciones, para caudal 5 m^3/s.
Fuente: Elaboración Propia

Las secciones transversales seleccionadas para el análisis fueron:

Tabla 4.8: Secciones Transversales Consideradas.

Tipo	Sección Transversal	N° Froude	Distancia desde Baker 1 [km]
Rápido	75831.2	>1	75.8
Poza	127168.5	<1	21.0

Fuente: Elaboración Propia

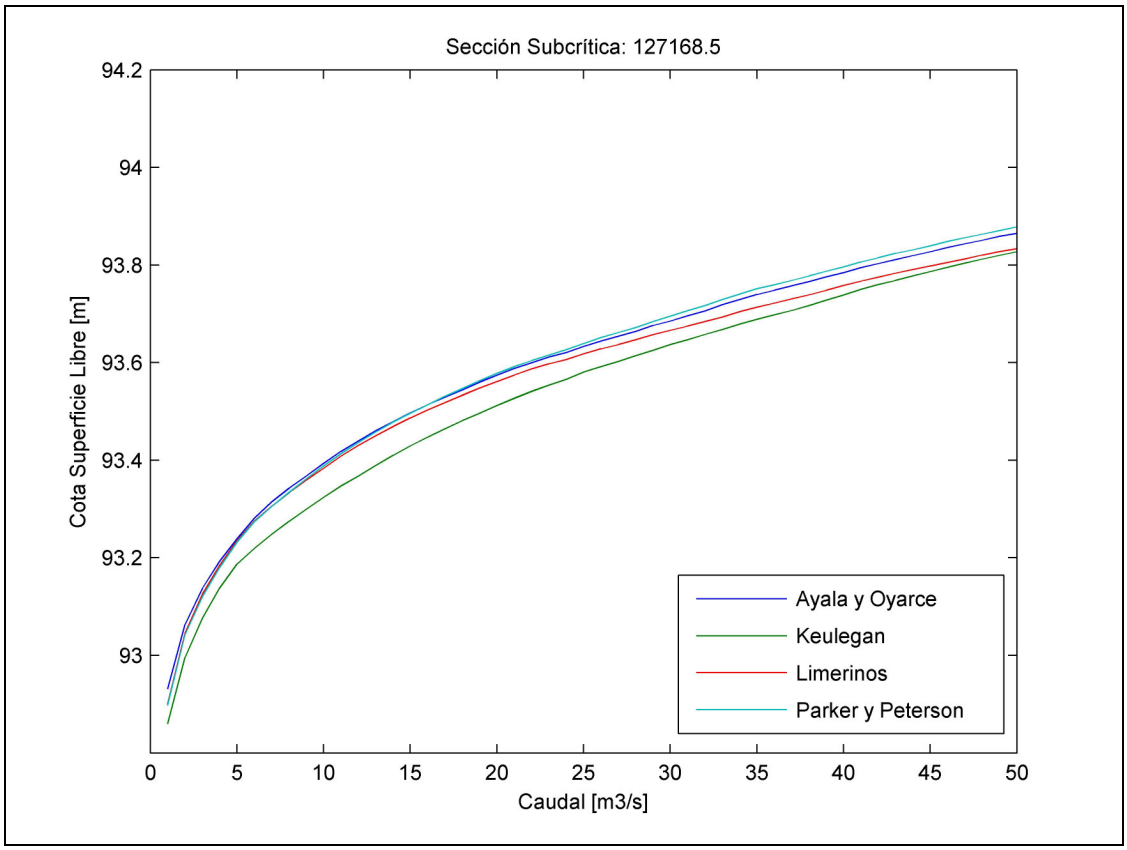


Figura 4.12: Resultados MR-HR: Cotas superficie libre del agua vs. Caudal (Sección Subcrítica)
Fuente: Elaboración Propia

De la figura (4.12) es interesante notar que en un comienzo, para caudales menores a 25 m^3/s, la parametrización de Ayala y Oyarce brinda las mayores cotas de superficie libre, luego para caudales superiores a 25 m^3/s, es la parametrización de Parker y Peterson la que brinda las mayores cotas. También, es interesente notar que para caudales sobre los 40 m^3/s, Limerinos brinda cotas de superficie libre similares a las de Keulegan. Según la figura (3.7), la cual representa el resumen de parametrizaciones ajustadas en función del inverso de rugosidad relativa, Limerinos brinda valores del número de Strickler, por lo general, mayores que la parametrización de Keulegan. En este contexto, debería brindar mayores valores de alturas de escurrimiento, salvo en las cercanías del lecho rugoso en donde todas las parametrizaciones convergen a 0.12. Entonces surgen las interrogantes si Keulegan y Limerinos convergen al lecho rugoso ¿por qué Ayala y Oyarce y Parker y Peterson no?, ¿deberían brindar todas las parametrizaciones la misma altura de escurrimiento si es que están convergiendo al lecho rugoso?, ¿por qué se alternan las mayores cotas de superficie libre en función del caudal?. Estas

preguntas sugieren analizar como evoluciona espacialmente el número de Strickler en función de la longitud del cauce para diferentes caudales, lo cual se muestra en las figuras (4.14) y (4.15).

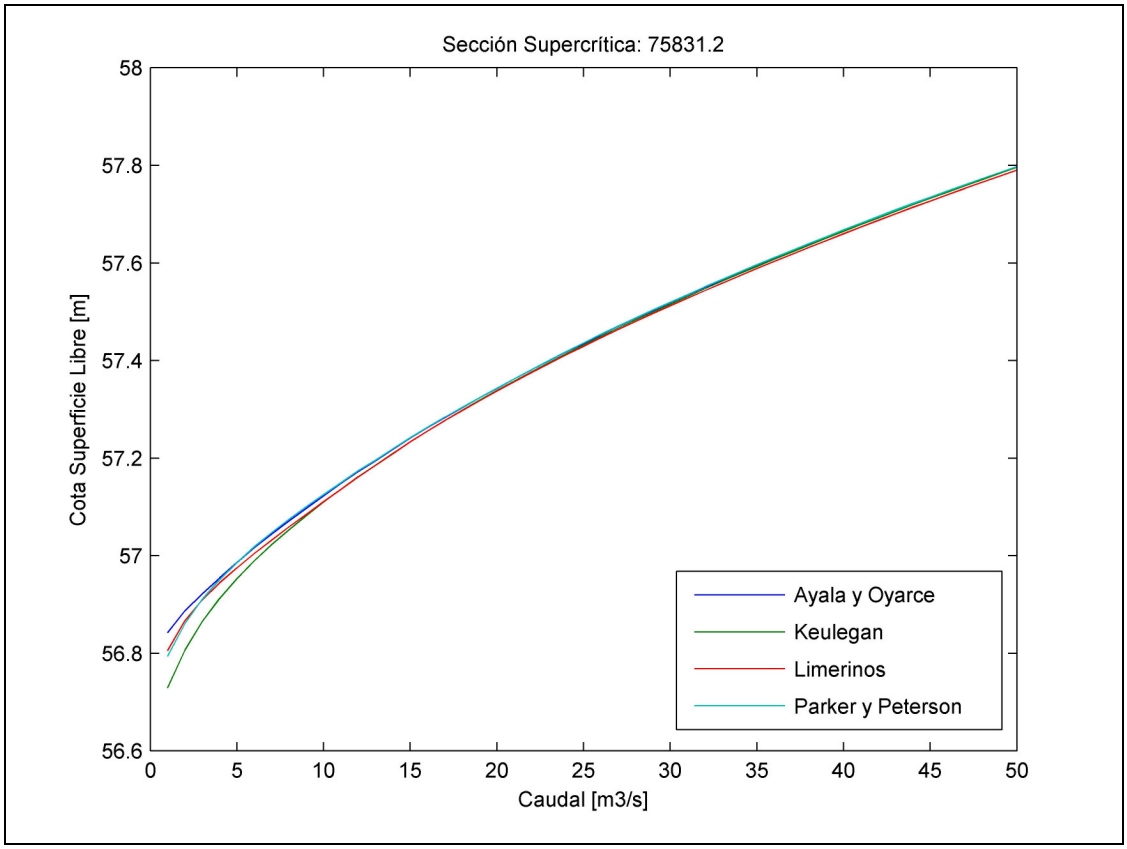


Figura 4.13: Resultados MR-HR: Cotas superficie libre del agua vs. Caudal (Supercrítico)
Fuente: Elaboración Propia

Para la condición de flujo supercrítico, en la figura (4.13) se aprecia que para caudales pequeños, comprendidos en el rango 1 a 10 m^3/s, se observan diferencias considerables entre las diferentes parametrizaciones. Luego, en el rango de 20 a 30 m^3/s, las cotas se tornan casi idénticas. Finalmente, en el rango de caudales mayores a 35 m^3/s, se observa que tienden a diferir, levemente, las parametrizaciones entre sí. Esto nuevamente sugiere el análisis de la evolución espacial del número de Strickler considerando distintos caudales, dado que las parametrizaciones son distintas, pero según la figura brindan valores similares aun cuando los lechos son macro rugosos en los rango de caudales bajos de 1 a 30 m^3/s.

Para una mejor interpretación de la evolución espacial del número de Strickler en función de diferentes caudales, se seleccionó un tramo particular del cauce en estudio. Este tramo corresponde al comprendido entre los kilómetros [15.5 - 18.5], medidos con respecto al origen en Baker 1. Se adjunta en el Anexo (B.5) dos videos que dan cuenta de está evolución completa. Nótese que la evolución espacial del número de Strickler conduce a la compresión de los comportamientos de las figuras (4.12) y (4.13) debido a que implícitamente se analiza como evolucionan los coeficientes de Manning y por tanto las alturas de escurrimiento.

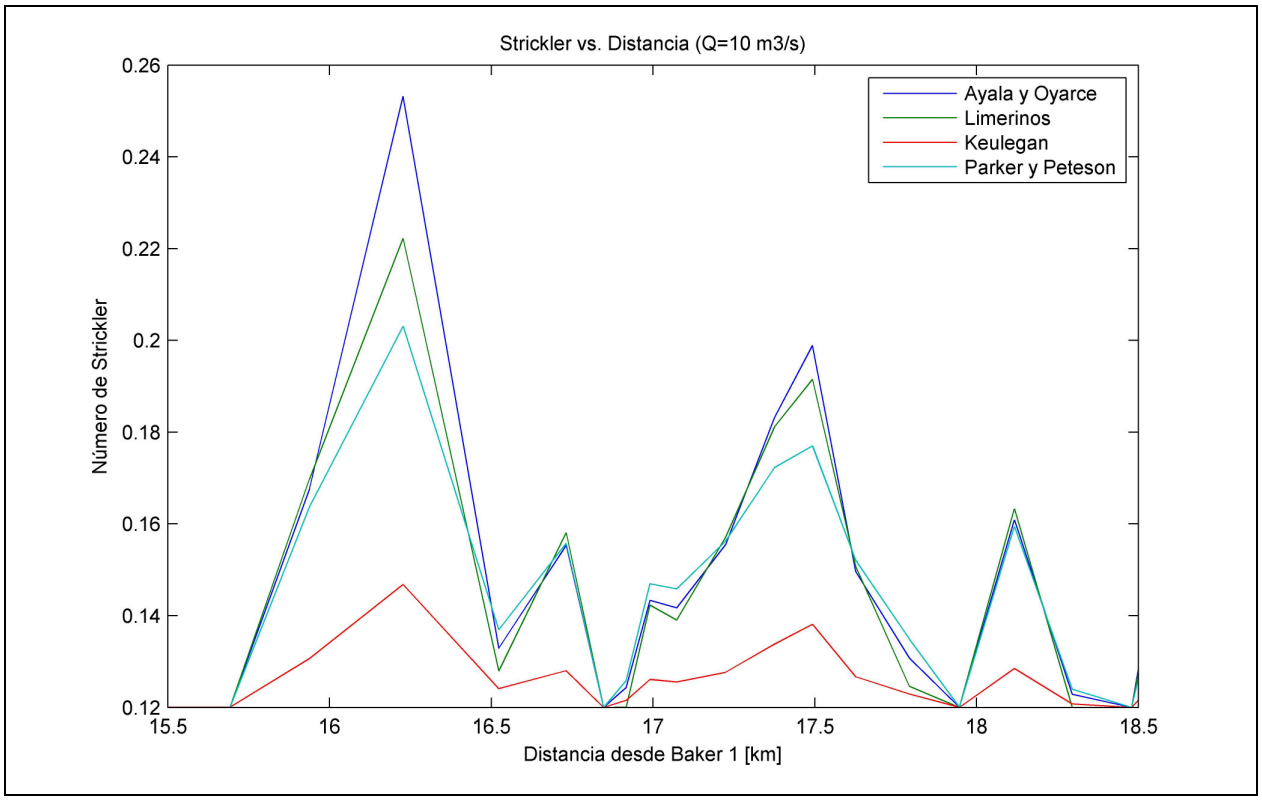


Figura 4.14: Resultados MR-HR: Evolución Espacial de Números de Strickler (Caudal 10 m^3/s)
Fuente: Elaboración propia

De la figura (4.14) se aprecia que no existe una única parametrización que entregue los mayores valores del número de Strickler, sino que más bien se observa una alternancia entre éstas. Entre las distancias 15.5 km y 16.5 km se tiene que los valores del número de Strickler, en orden decreciente, son: Ayala y Oyarce, Limerinos, Parker y Peterson y Keulegan. En el kilómetro 17 se observa el siguiente ordenamiento decreciente: Parker y Peterson, Ayala y Oyarce, Limerinos y Keulegan. Hacia el final del tramo, entre los kilómetros 18 y 18.5, los números de Strickler en orden decreciente son Limerinos, Ayala y Oyarce, Parker y Peterson y

Keulegan, aun cuando Limerinos, Ayala y Oyarce, Parker y Peterson pueden considerarse iguales.

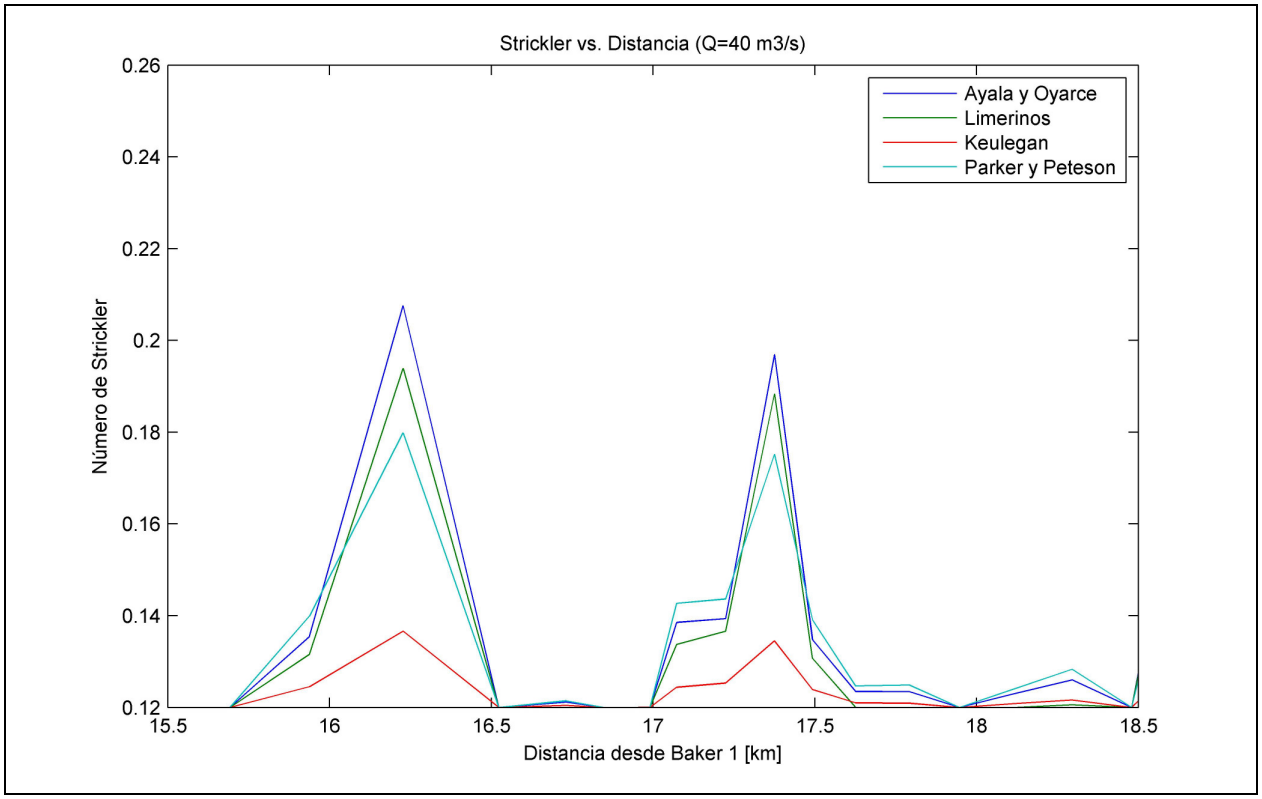


Figura 4.15: Resultados MR-HR: Evolución Espacial de Números de Strickler (Caudal 40 m^3/s)
Fuente: Elaboración propia

De la figura (4.15) se aprecian cambios considerables con respecto a la figura (4.14). Primero que todo, las amplitudes del número de Strickler han disminuido, lo cual es correcto debido a que a mayores caudales el escurrimiento tiende a ser rugoso, como se apreció en la figura (4.10). Entre las distancias 15.5 km y 16 km, se tiene un tramo donde la parametrización que brinda el mayor número de Strickler es Parker y Peterson. Lo mismo ocurre en el tramo comprendido entre los kilómetros 18 y 18.5. En este último tramo también se observa que la parametrización de Limerinos converge más rápido que la de Keulegan al escurrimiento rugoso.

Los comportamientos descritos en base a las figuras (4.14) y (4.15), alternancia en los valores del número de Strickler a lo largo del cauce proporcionados por las distintas parametrizaciones y velocidad de convergencia a escurrimientos sobre lechos rugosos, no se explican totalmente en términos de la figura (3.7) que representa el resumen de parametrizaciones

ajustadas en función del inverso de la rugosidad relativa. Esto se debe a que la evolución espacial del número de Strickler en función del caudal, está íntimamente ligado con la parametrización seleccionada, la forma del cauce particular estudiado, las condiciones de borde y el caudal. Esto ocurre debido a que el número de Strickler es variable a lo largo de todo el cauce y entonces, dependiendo de la parametrización seleccionada, los números de Strickler pueden provocar secciones de control hidráulico, cambiando los tipos de escurrimientos y por ende las alturas de escurrimiento.

Para ejemplificar aún mejor los conceptos anteriormente descritos, se presenta la figura (4.16). Esta figura muestra la sección transversal número 117610.3, la cual es rugosa para todo el rango de caudales, es decir, tiene un Strickler constante e igual a 0.12. Esto implica a que en este punto del cauce en particular, los coeficientes de Manning brindados por las distintas parametrizaciones sean idénticos. Sin embargo las cotas de superficie libre del agua no lo son.

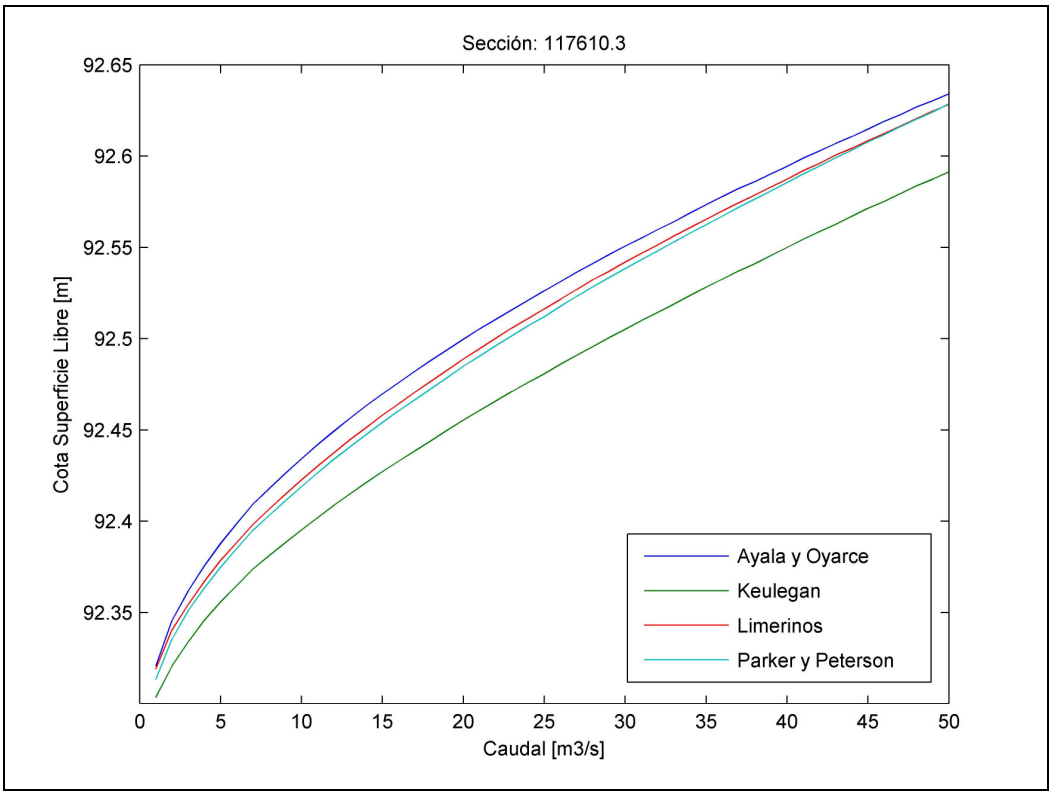


Figura 4.16: Resultados MR-HR: Cotas superficie libre del agua vs. Caudal
Fuente: Elaboración Propia.

Las cotas de superficie libre del agua no son idénticas a pesar de ser un escurrimiento rugoso en ésta sección, esto se debe a la influencia que ejerce en este punto la distribución espacial de los números de Strickler y, consecuentemente, los coeficientes de Manning a lo largo del cauce, según la parametrización seleccionada.

En la segunda etapa se planteó el análisis de las diferencias brindadas por las diferentes parametrizaciones en su forma más general, es decir, permitiendo que la macro rugosidad dependiera tanto del desarrollo del eje hidráulico como de la variación longitudinal de los diámetros característicos a lo largo del cauce versus proponer un coeficiente de Manning uniforme para todo el cauce, basado en el cálculo previo del diámetro característico asociado al valor medio ponderado.

La interpolación lineal de los diámetros característicos se basaron en los datos proporcionados por la tabla (4.3). Esta interpolación se resume en la siguiente figura[5]:

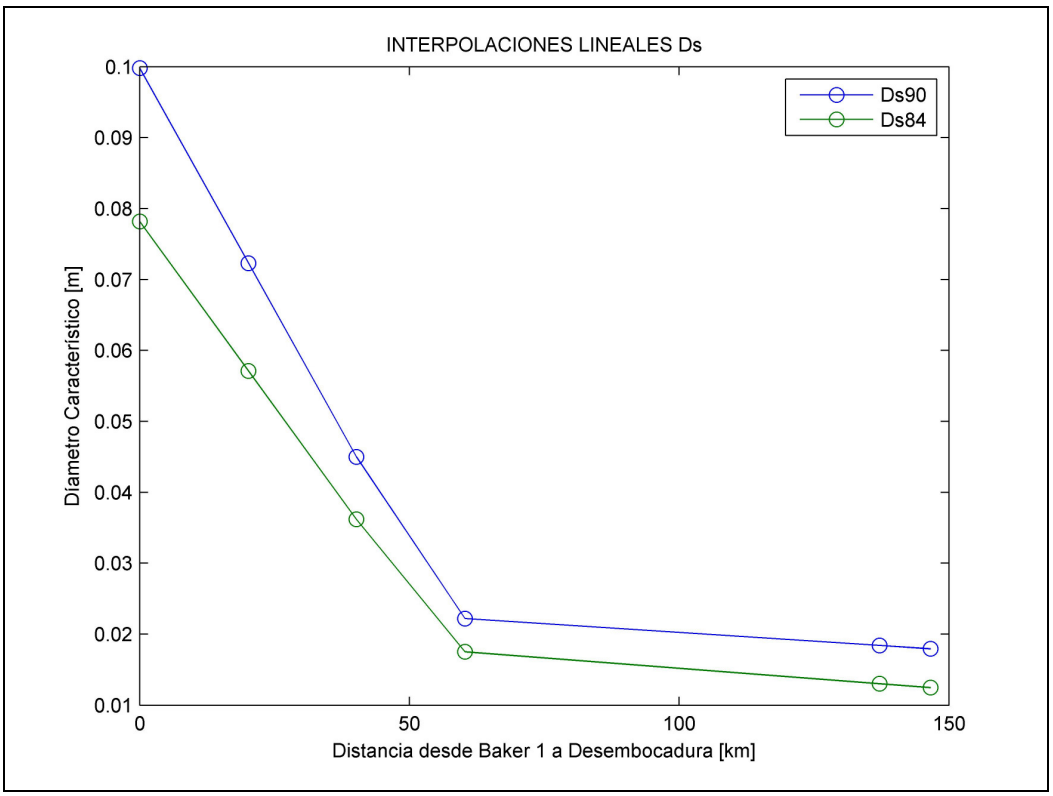


Figura 4.17: Interpolación lineal realizada a los sedimentos del sustrato del lecho
Fuente: Elaboración Propia.

[5] Para consultar en detalle las interpolaciones realizadas por MR-HR, véase el Anexo (B.5).

Luego se definieron coeficientes de Manning uniformes basados en los resultados obtenidos en la tabla (4.7). Para esto se consideraron los diámetros característicos asociados al valor medio ponderado, con la finalidad de que éstos fueran representativos del cauce en estudio. Además se asumió que el coeficiente de Manning dependía sólo del diámetro característico de los sedimentos y no del desarrollo del eje hidráulico, es decir, se asumió que el lecho era rugoso con un número de Strickler uniforme a lo largo del cauce igual a 0.12. Entonces, con la ayuda de la ecuación (2.4) se calcularon dos coeficientes de Manning para todo el cauce, los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4.9: Coeficientes de Manning Uniformes Basados en Valores Medios Ponderados de Diámetros Característicos.

Coeficientes de Manning ($sm^{-1/3}$)	
$n_{(D90)}$	$n_{(D84)}$
0.0212	0.0204

Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente, para cuantificar el efecto de considerar un lecho rugoso con un único diámetro característico versus uno macro rugoso, se trabajó con las diferencias en las alturas de escurrimiento. Estas diferencias son con respecto al caso de Manning uniforme correspondientes a D_{90} de la tabla anterior. Se escogió ese coeficiente para minimizar las diferencias esperadas e intentar ser objetivo en la comparación. En la figura (4.18) se muestran las diferencias anteriormente señaladas para un caudal de 5 m^3/s. Bajo éstas condiciones el problema presenta, en su mayoría, régimen de escurrimiento subcrítico, es decir, números de Froude menores a la unidad, salvo en las secciones transversales donde ocurren rápidos que corresponden a las diferencias nulas entre las diferentes parametrizaciones y la proposición del coeficiente de Manning uniforme a lo largo de todo el cauce. Estas secciones se caracterizan por tener gran pendiente y un número de Froude muy cercano a la unidad, produciendo crisis y desconectando hidráulicamente los escurrimientos entre los diferentes tramos del río. Para fijar idea, la figura (4.11) muestra las zonas donde se producen las crisis, las cuales corresponden a las mismas secciones mostradas en la figura (4.18). En los extremos es posible apreciar que, para este caso en particular, las condiciones de borde no ejercen demasiada influencia en el cauce dado que cercano a ellas se producen crisis.

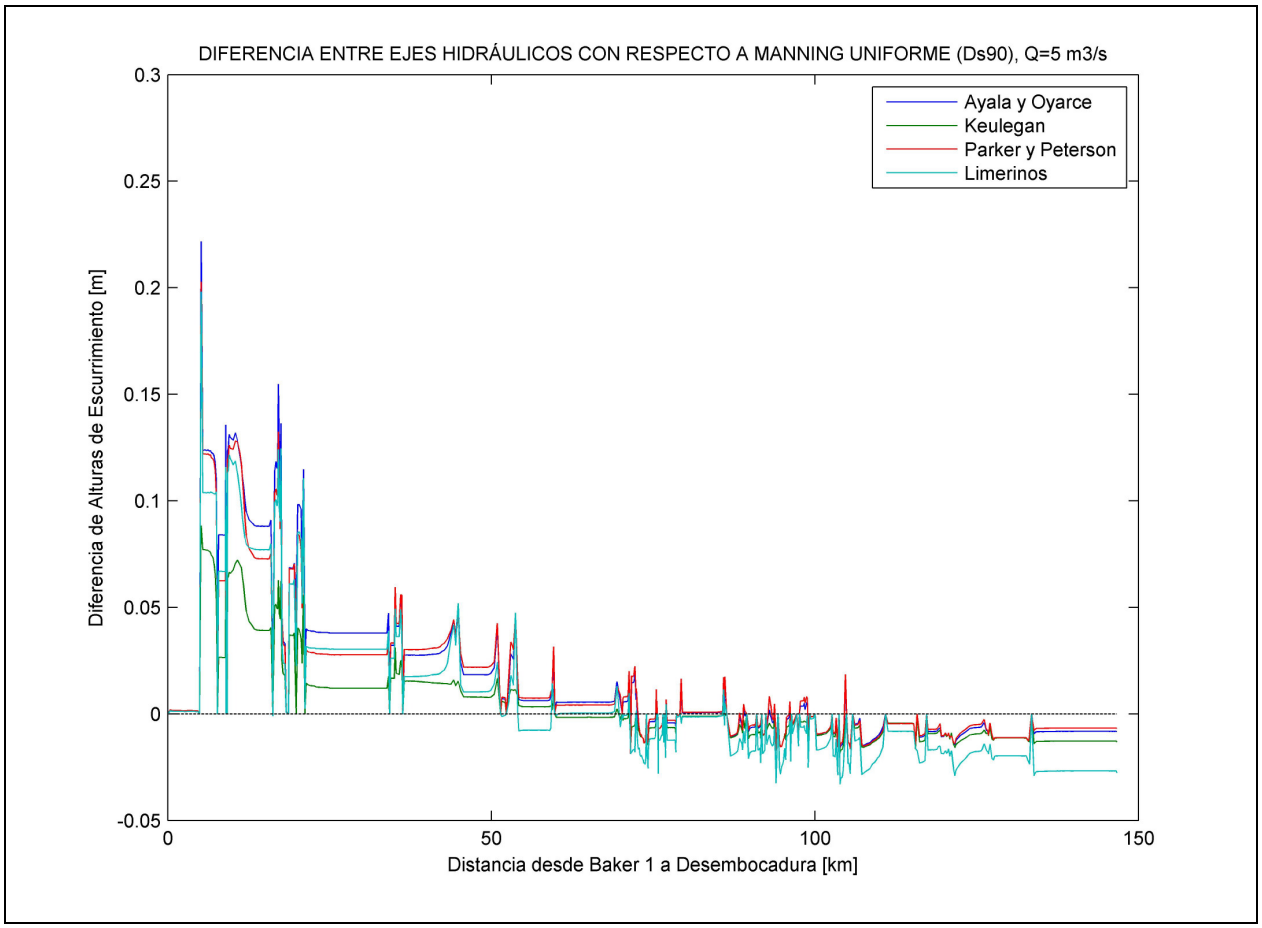


Figura 4.18: Diferencia entre Ejes Hidráulicos con Respecto a Manning Uniforme (Ds_{90}), Q=5 m^3/s
Fuente: Elaboración Propia

Con respecto a las diferencias, como se dijo anteriormente, no existe un predominio exclusivo de alguna parametrización por sobre las demás, sino que se alternan. En los primeros 70 kilómetros se observa un aumento paulatino de las diferencias debido a que en este tramo la interpolación lineal de los sedimentos del lecho es creciente a medida que se acerca al origen del cauce, lo que implica que se agudiza la macro rugosidad. Por el contrario, posterior a los 70 kilómetros los diámetros característicos son decrecientes y junto con ello también la macro rugosidad. Las diferencias se tornan negativas dado que, en sus tramos correspondientes, el lecho se comporta tanto macro rugoso como rugoso. Si bien al comportarse como macro rugoso el número de Strickler es superior a 0.12, el diámetro característico es inferior al medio ponderado por lo que se produce una competencia entre el número de Strickler y la raíz sexta de los tamaños de sedimentos en la determinación de los coeficientes de Manning, lo cual se puede apreciar en la ecuación (2.4). Esta competencia conduce a que los coeficientes de Manning sean inferiores a los

proporcionados por el valor medio ponderado y consecuentemente las alturas de escurrimiento. En la zonas donde el lecho se comporta como rugoso es evidente que los coeficientes de Manning sean inferiores a los proporcionados por el valor medio ponderado Ds_{90}, ya que el tamaño de los sedimentos es inferior. La siguiente figura da cuenta de cuando el lecho se comporta como macro rugoso y cuando no.

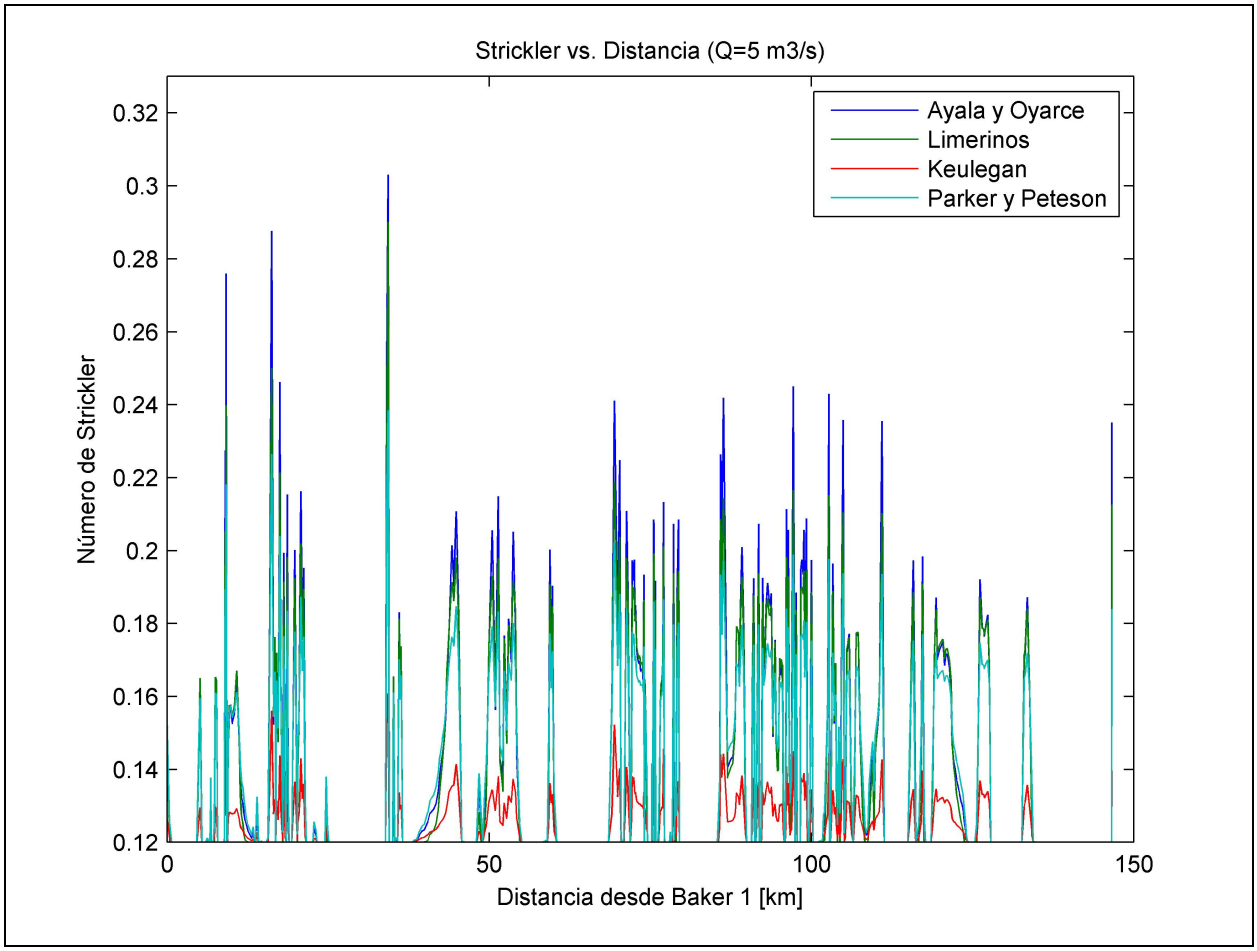


Figura 4.19: Resultados MR-HR: Evolución Espacial de Números de Strickler (Caudal 5 m^3/s)
Fuente: Elaboración propia

De la figura (4.19) se observa que aguas abajo, en la condición de borde km. 148, se genera macro rugosidad. La condición de borde es de altura normal con la respectiva pendiente del terreno de esa zona. Inmediatamente aguas arriba de la condición de borde no se observa macro rugosidad dado el cambio de geometría desde una muy llana a una desnivelada. Para el caudal 5 m^3/s el escurrimiento en esa zona es subcrítico por lo que la altura de escurrimiento es

determinada por la macro rugosidad, lo que se puede interpretar en la figura (4.18) como las diferencias de alturas de escurrimiento brindadas por las diferentes parametrizaciones.

Los resultados anteriormente brindados no deben interpretarse como absolutos, debido a que son referentes al cauce particular estudiado y a las condiciones a las que está sometido. Por ejemplo, en un cauce con escurrimiento subcrítico en donde no se generen crisis, el efecto de la macro rugosidad podría remontarse aguas arriba del cauce, llegando a su inicio. Esto podría agudizar aun más las diferencias en las alturas de escurrimiento en función de cuan macro rugoso se comporte el lecho. Por el contrario, las diferencias podrían ser menores si el lecho se comporta en la transición entre la rugosidad y la macro rugosidad. Sin embargo, las diferencias entre alturas de escurrimientos aplicado en este análisis son sólo para fijar idea, debido a que no son el tema de fondo sino la variación de los coeficiente de Manning, ya que por ejemplo para una geometría de un cauce llano, en términos de sus secciones transversales, el efecto de la macro rugosidad no se vería reflejado en forma tan marcada como en el caso anterior. Por otra parte, la selección del coeficiente de Manning uniforme para todo el cauce, se realizó en pro de minimizar las diferencias en base a la experiencia del autor de este trabajo. Sin embargo, no es justo comparar un sólo coeficiente de Manning uniforme a lo largo de todo el cauce, basado en un diámetro característico "representativo", con un enfoque que considera toda la variabilidad de los sedimentos del lecho en el eje longitudinal. Más bien la comparación debería incluir coeficientes de Manning uniformes, pero variables por tramos, lo cual tendería a minimizar las diferencias anteriormente mostradas. Por lo tanto, el ejemplo aquí propuesto tiene como objetivo fijar idea de lo que ocurre en términos generales y por ningún motivo deben extrapolarse sus resultados a otro tipo de cauces sometidos a diferentes condiciones.

Capítulo 5. Discusión y Alcances

En lo que respecta al diseño e implementación de MR-HR, es importante reconocer que las principales limitaciones, vistas desde el punto de vista hidráulico, están condicionadas por la interacción con HEC-RAS. Sin embargo y según los antecedentes revisados en este trabajo, se concluye que MR-HR es capaz de enfrentar problemas frecuentes de la ingeniería hidráulica. Esto se refleja en que se pueden abordar: cauces no prismáticos, problemas en régimen turbulento, problemas con pared hidrodinámicamente rugosa, problemas con pendientes inferiores al 10%, etc. Estas son condiciones que se dan en general en los cauces naturales y son muy recurrentes en el que hacer cotidiano del ingeniero hidráulico.

Con respecto a la aplicación de MR-HR al río Baker, vale la pena mencionar que se utilizaron caudales tan bajos, de 1 a 50 m^3/s, dado que en este rango el lecho se comportaba como macro rugoso, y para valores superiores del caudal la aplicación de MR-HR perdía un poco de sentido al comportarse el lecho como rugoso, debido a que la altura de escurrimiento en el cauce provocaba inversos de rugosidades relativas superiores a 10.

En cuanto a los resultados brindados por MR-HR, considerando sólo un diámetro característico para todo el cauce, fue posible concluir que las alturas de escurrimiento están fuertemente influenciadas por la distribución espacial de los números de Strickler que a su vez depende de la parametrización seleccionada, el caudal, las condiciones de borde del problema y la geometría. Esto produce una carencia de generalidad en términos de los resultados esperados en función de las diversas parametrizaciones, es decir, no es posible asumir que siempre la selección de una determinada parametrización brindará mayores o menores alturas de escurrimiento en una determinada posición del cauce en comparación con las demás. La influencia que ejerce la distribución espacial de los números de Strickler en un punto particular del cauce, podría producir secciones de control hidráulico que alteren considerablemente el desarrollo del eje hidráulico entre una parametrización y otra. Sin embargo, en general es posible esperar que el número de Strickler promediado a lo largo de todo el cauce se comporte en forma acorde a las parametrizaciones revisadas en este trabajo, considerando su dependencia única y exclusivamente con el inverso de la rugosidad, es decir, se esperan números de Strickler promedio mayores según la selección de la parametrización, pero esto no implica que se pueda

extender al desarrollo del eje hidráulico. Por lo tanto, y dada la falta de generalización, en caso de no contar con una selección adecuada de alguna parametrización, se recomienda evaluar los resultados de todas las parametrizaciones en la aplicación de MR-HR y adoptar como válido el eje hidráulico en función del tipo de problema que se enfrenta y su criterio.

En el contexto de comparar los resultados proporcionados por MR-HR, considerando toda la información granulométrica del lecho, versus la selección de un coeficiente de Manning uniforme a lo largo de todo el cauce, se apreció que en particular para el cauce estudiado las condiciones de borde del problema no juegan un rol predominante en el desarrollo de todo el eje hidráulico, dadas las desconexiones hidráulicas que ocurren a lo largo del cauce. Sin embargo, esto ocurre particularmente en el cauce aquí estudiado y no debe ser siempre interpretado de la misma manera. En lo que respecta a la influencia que ejerce la distribución espacial de los números de Strickler en una determinada posición, se observó nuevamente una carencia de generalidad en cuanto a las alturas de escurrimiento brindadas por las diferentes parametrizaciones en términos que no existe una parametrización que siempre brinde mayores alturas de escurrimiento por sobre las demás. Con respecto a las diferencias de alturas de escurrimiento obtenidas, éstas son sólo para fijar idea, ya que están sujetas a las condiciones particulares del cauce, y no representan el problema de fondo el cual es reconocer que la ecuación de Manning no es válida para lechos macro rugosos, por lo que MR-HR si resuelve el problema de fondo que es la determinación correcta de los coeficientes de Manning con la ayuda de HEC-RAS, y consecuentemente los respectivos ejes hidráulicos.

Por lo tanto, se recomienda no generalizar los resultados obtenidos en la aplicación particular de MR-HR realizada en este trabajo y en caso que se disponga de alturas de escurrimiento, compararlas con los resultados brindados tanto por MR-HR como los resultados proporcionados a partir de tabulaciones de coeficientes de Manning para decidir cual representa mejor el cauce en estudio.

Bibliografía

1. AYALA, L. y OYARCE, O. (1993). *Pérdida de carga de cauces cordilleranos sujetos a acorazamiento y arrastre* En: XI CONGRESO Chileno de Ingeniería Hidráulica. Concepción, Universidad de Concepción. Vol. 2, pp. 1-15.

2. BRADLEY, J. C. AND MILLSPAUGHASDF A. (2009). *Advanced Programming Using Visual Basic 2008*. 4th Edition USA, McGraw-Hill. 672p.

3. BRADLEY, J. C. AND MILLSPAUGHASDF A. (2010). *Programming in Visual Basic 2010*. USA, McGraw-Hill. 704p.

4. CENTRALES HIDROELECTRICAS DE AYSEN S.A. (2008). *Estudio de Impacto Ambiental: Proyecto Hidroeléctrico Aysén*. 1973p

5. CHOW V. T. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Santafé de Bogotá, McGraw-Hill. 667p.

6. KEULEGAN, G. (1938). *Laws of turbulent flow in open channels*. National Bureau of Standards, Research Paper 1151 (U.S.). 21(6):707-741.

7. LIMERINOS, J. (1970). *Determination of the Manning Coefficient from Measured Bed Roughness in Natural Channels*. Geological Survey Water-Supply Paper 1898-B.

8. MICROSOFT (2011a). *Developing Applications with Visual Basic*. [en línea] <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/k6a6etxs>. [consulta : 25 septiembre 2011].

9. MICROSOFT (2011b). *Visual Basic Programming Guide*. [en línea] < http://msdn.microsoft.com/en-us/library/y4wf33f0>. [consulta : 30 septiembre 2011].

10. NIÑO, Y. (2003). *Resistencia Hidráulica en Canales Aluviales*. En: Apuntes del Curso CI61F Transporte Hidráulico de Sólidos, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. pp. 24-28.

11. OYARCE, O. (1993). *Diseño, Construcción y Operación del Modelo Físico de un Prototipo Representativo de Cauces Cordilleranos Andinos*. Memoria Para Optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 159p.

12. PARKER, G. AND PETERSON, A. (1980). *Bar Resistance Of Gravel-Bed Streams*. Journal Of The Hydraulics Division, ASCE. 106(HY10):1559-1575.

13. STRICKLER, A. (1923). *Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauhigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen (Some contributions to the problem of velocity formula and roughness factors for rivers, canals, and closed conduits).* Mitteilungen des eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft, N°16, Bern Switzerland.

14. UNIVERSIDAD DE CHILE (2010). *Antecedentes Complementarios a la Caracterización Granulométrica de los Ríos Baker y Pascua*. Grupo de Investigación en Procesos de Transporte y Flujos Ambientales, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

15. U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE) (1994). *Methods for Predicting n Values for the Manning Equation*. En: Engineering and Design: Hydraulic Design of Flood Control Channels, Engineer Manual No. 1110-2-1601. Washington, USA. pp. 5.1-5.14.

16. U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE) (2010a). *HEC-RAS River Analysis System: Applications Guide*, *version 4.1*. California, USA, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC). 351p.

17. U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE) (2010b). *HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual*, *version 4.1*. California, USA, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC). 417p

18. U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE) (2010c). *HEC-RAS River Analysis System: User's Manual*, *version 4.1*. California, USA, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC). 790p

Anexo A. Manual de uso MR-HR

A.1 Generalidades

MR-HR es una herramienta de acople a HEC-RAS, que calcula los coeficientes de Manning mediante diferentes parametrizaciones del número de Strickler. Para esto realiza las iteraciones que el usuario desee hasta lograr la convergencia de los coeficientes. Si bien, MR-HR está principalmente enfocado en problemas de lechos macro rugosos, también resuelve problemas de lechos rugosos mediante transiciones suaves realizadas a las parametrizaciones de Keulegan (1938), Limerinos (1970), Parker y Peterson (1980) y Ayala y Oyarce (1993).

A.2 Instalación

MR-HR consiste en tres archivos que deben estar localizados en una misma ruta sin importar esta. En la siguiente figura se muestra un ejemplo:

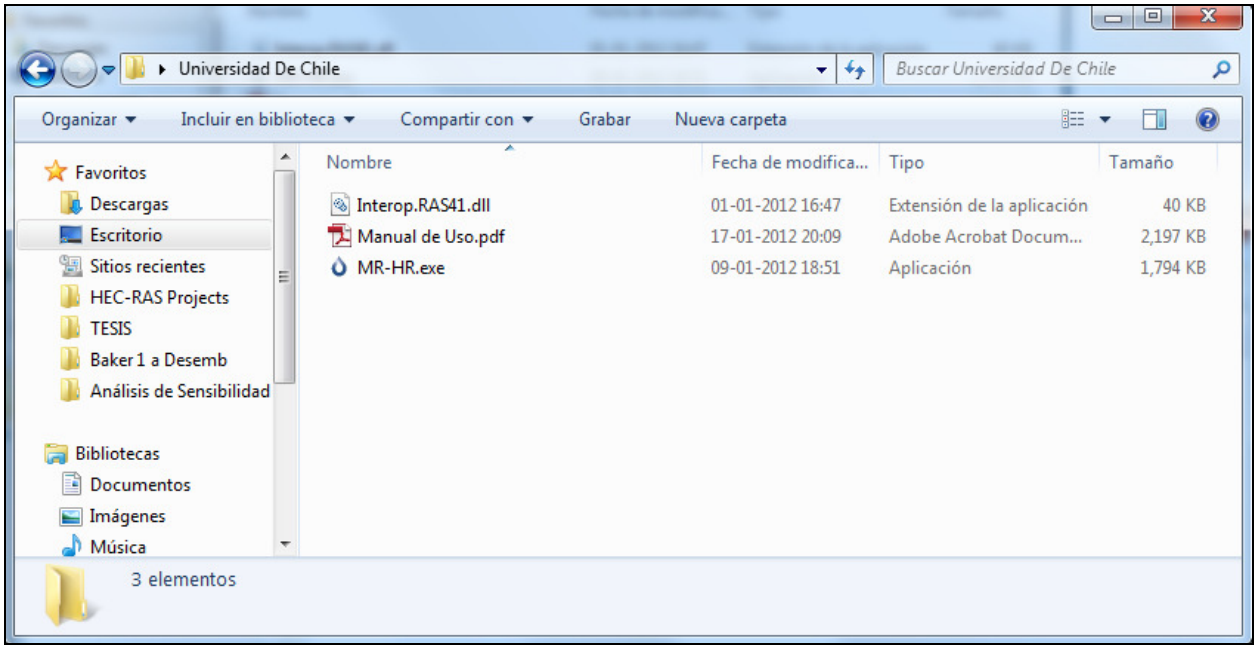


Figura A-1: Ejemplo de Instalación MR-HR.
Fuente: Elaboración Propia

Los tres archivos que se aprecian en la figura (A-1) son: Iterop.RAS41.dll, MR-HR.exe y Manual de Uso.pdf. El primero representa el enlace entre MR-HR y HEC-RAS 4.1.0. El segundo, que tiene por icono una gota de agua, representa el archivo ejecutable que abre el programa y el tercero este Manual de Uso.

A.3 Requisitos

A.3.1 Computacionales

Los requerimientos computacionales que necesita MR-HR para su correcto funcionamiento son los siguientes:

- Tener instalado el sistema operativo Microsoft Windows[6] XP, Microsoft Windows Vista o Microsoft Windows 7, ya sea en sus versiones de 32-bits como la de 64-bits.

- Tener instalado Microsoft .NET Framework [7], versión 2.0 o superior (requisito que se cumple por defecto al tener instalado Microsoft Windows XP o superior).

- Tener instalado HEC-RAS 4.1.0,[8] y crear los proyectos en la misma versión.

- Tener instalado algún lector de archivos PDF para la visualización del Manual de Uso, como por ejemplo Adobe Reader[9].

[6] La configuración regional de Windows debe tener como separador de decimales el punto.
[7] Programa de distribución gratuita. Más información: http://www.microsoft.com/
[8] Programa de distribución gratuita. Más información: http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/
[9] Programa de distribución gratuita. Más información: http://get.adobe.com/es/reader/

A.3.2 Proyecto Importado desde HEC-RAS

Para el correcto funcionamiento de MR-HR, los proyectos creados en HEC-RAS 4.1.0 deben contener sólo un tramo y un sólo río. Este requisito no implica pérdida de generalidad desde el punto de vista del cauce principal, dado que HEC-RAS aplica en nodos (puntos donde confluyen o divergen dos o más ríos) igualdad de energía y en caso que se requiera la función de momentum. Por lo tanto, teniendo en cuenta estos principios es posible modelar sólo el cauce principal e ingresar las magnitudes de caudales que ingresan o egresan del cauce principal sin afectar el desarrollo del eje hidráulico.

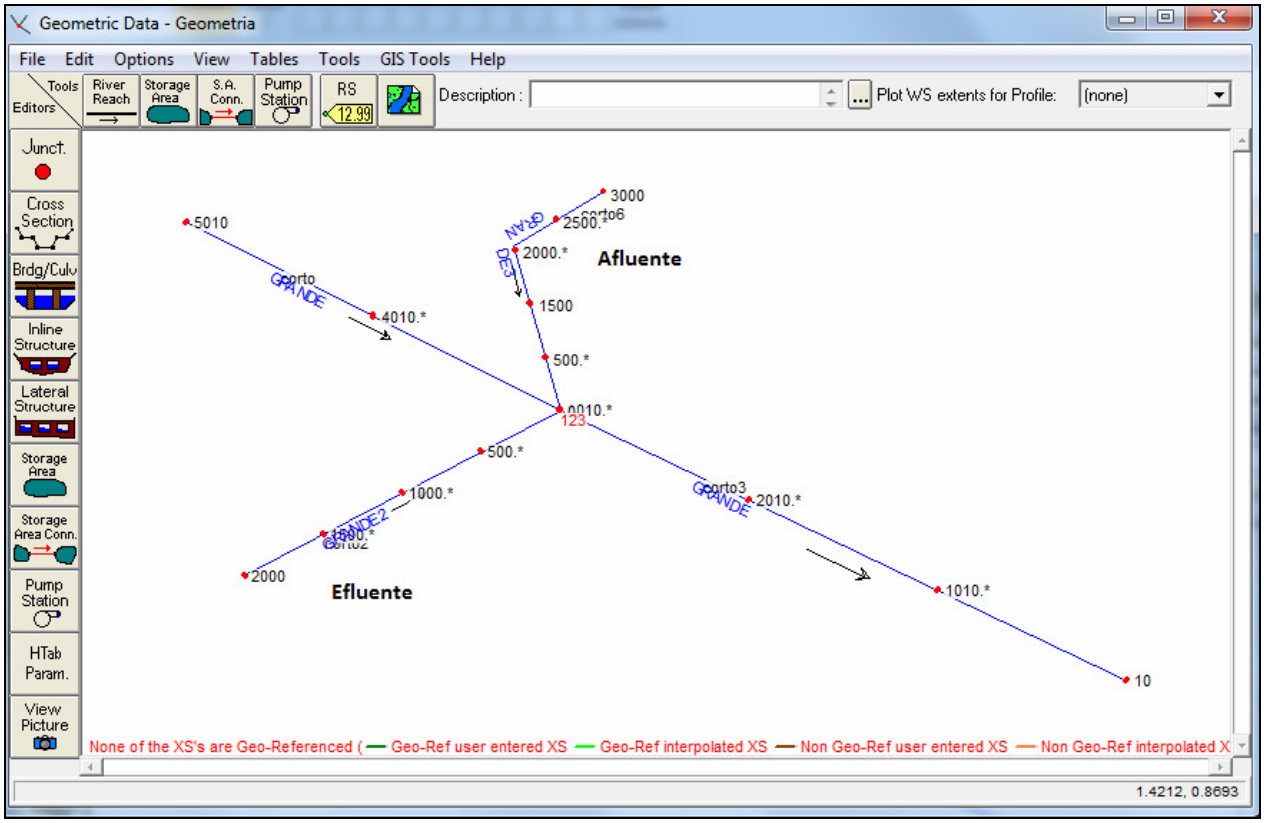


Figura A-2: Proyecto creado en HEC-RAS no compatible con MR-HR
Fuente: Elaboración Propia

La figura (A-2), no es compatible con MR-HR dado que contiene tanto un afluente como un efluente en la sección del tramo principal 3030.*. Para resolver esto se debe modelar sólo un cauce principal y hacer un balance de caudal en la sección donde converge el afluente y donde diverge el efluente. Esto se denomina nodo fantasma. Entonces en este nodo fantasma (sección

3030.*) se debe ingresar el balance total de caudal, es decir, el caudal proveniente de aguas arriba más el caudal aportado por el afluente menos el caudal del efluente.

A continuación se muestra un proyecto correctamente creado en HEC-RAS, para su posterior utilización en MR-HR:

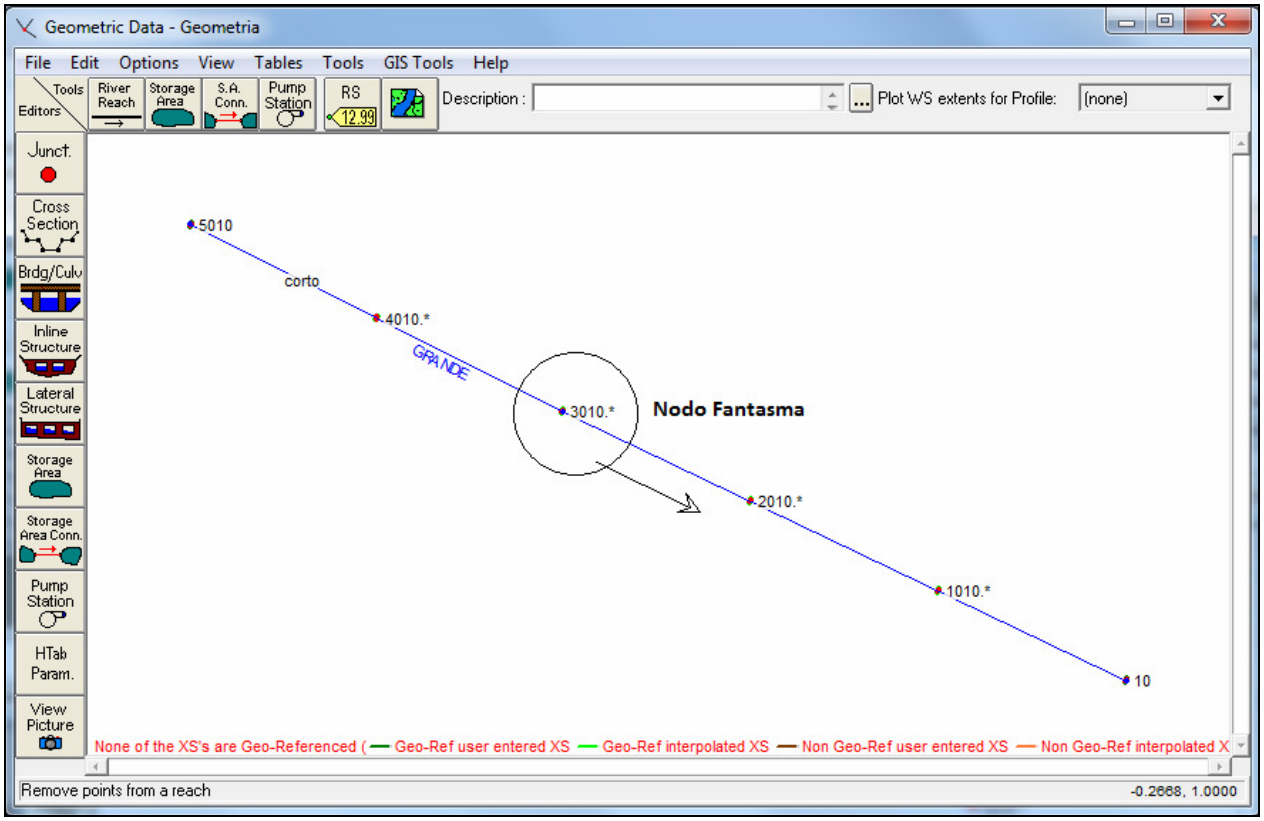


Figura A-3: Proyecto creado en HEC-RAS compatible con MR-HR
Fuente: Elaboración Propia

Es posible observar de la figura (A-3) que se eliminaron los afluentes y efluentes. Para fijar idea, supongamos que desde aguas arriba (sección 5010) provienen 5 m^3/s, el afluente aporta 2 m^3/s y el efluente extrae 3 m^3/s. Entonces el balance de caudal en el nodo fantasma es de 4 m^3/s. Esto se refleja en la siguiente figura:

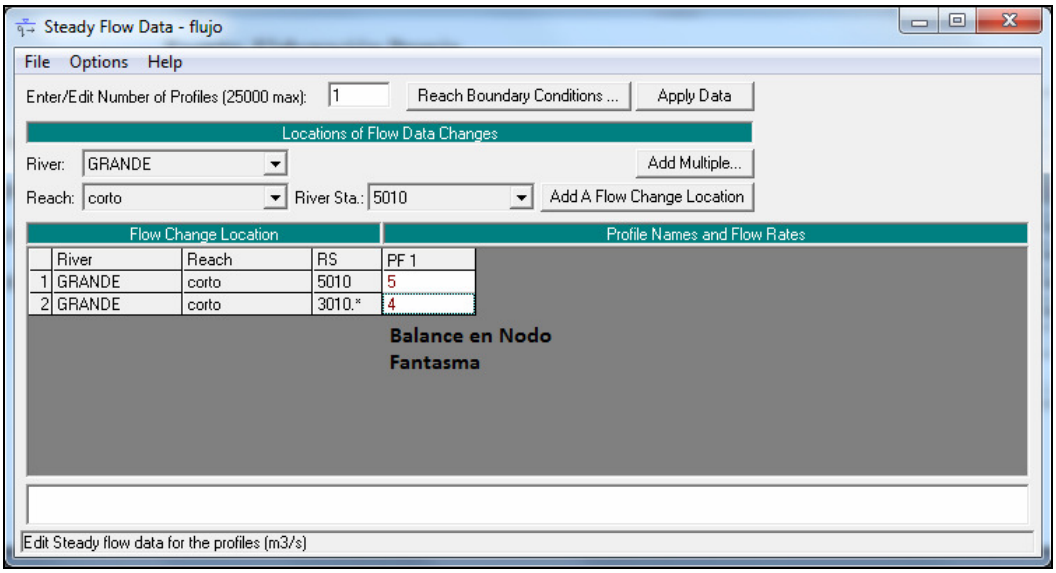


Figura A-4: Proyecto creado en HEC-RAS compatible con MR-HR.
Fuente: Elaboración Propia.

La figuras (A-3) y (A-4) producen un eje hidráulico idéntico al de la figura (A-2), desde el punto de vista del cauce principal, mediante el ingreso de balances de caudal en los nodos fantasmas. Recordar que para esta aplicación se debe tener en mente los principios de conservación de la Energía y la función de Momentum, que son los principios que HEC-RAS utiliza por defecto.

Otro requisito del proyecto creado en HEC-RAS, es que solo puede existir un perfil de flujo, si se quieren evaluar más de un perfil de flujo, MR-HR permite la evaluación de múltiples perfiles de flujo vía configuración adentro de MR-HR. A continuación se muestra una configuración de perfiles de flujo no compatible con MR-HR, representada por la figura (A-5), y una configuración de perfil de flujo que es compatible con MR-HR, representada por la figura (A-6).

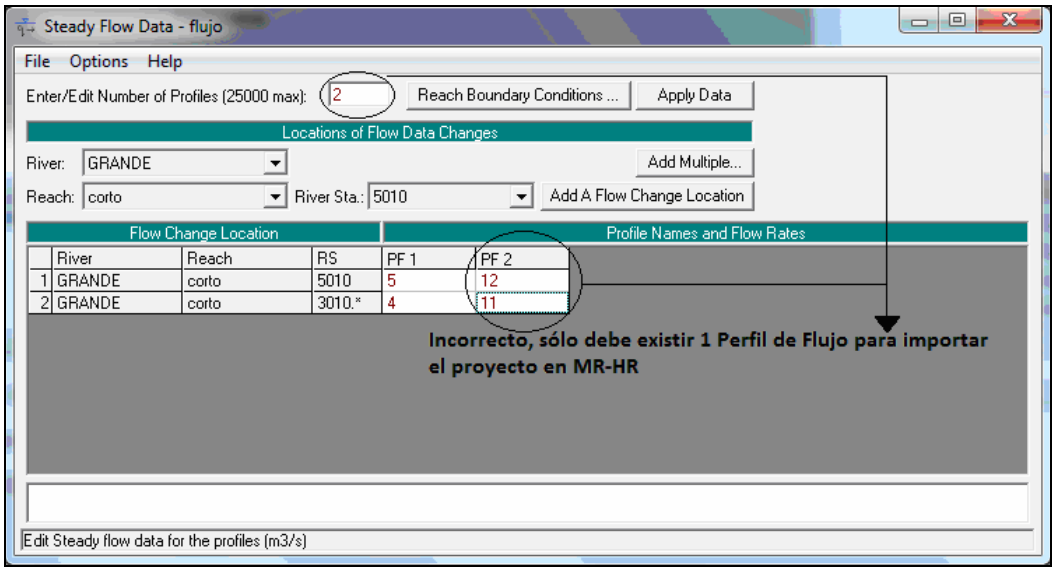


Figura A-5: Proyecto creado en HEC-RAS no compatible con MR-HR.
Fuente: Elaboración Propia.

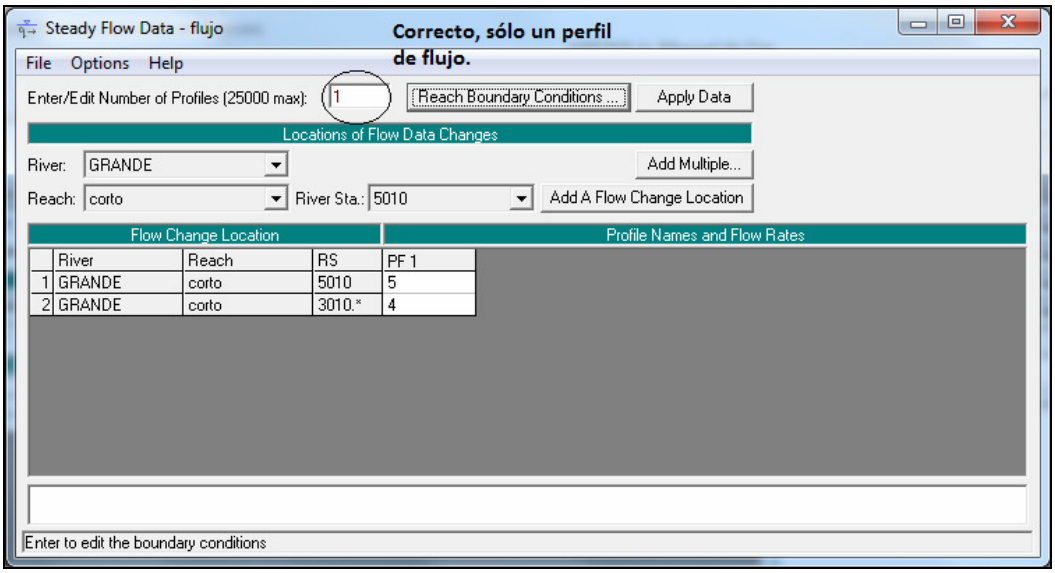


Figura A-6: Proyecto creado en HEC-RAS compatible con MR-HR.
Fuente: Elaboración Propia.

En el punto (A.4.3) que representa el Submenú de Configuración de MR-HR se explicará como configurar proyectos, adentro de MR-HR, para uno o más perfiles de flujo.

Finalmente, para el correcto funcionamiento de MR-HR los proyectos creados en HEC-RAS deben tener asociados un PLAN, GEOMETRÍA y FLUJO.

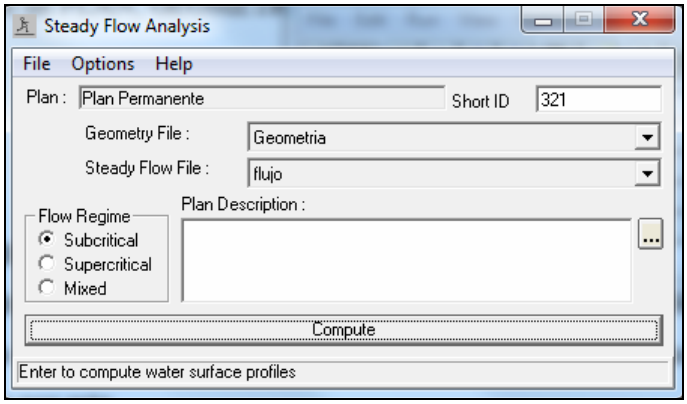


Figura A-7: Proyecto Creado en HEC-RAS compatible con MR-HR.
Fuente: Elaboración Propia.

De la figura (A-7) es posible observar que el proyecto creado en HEC-RAS, contiene asociado:

- PLAN : Plan Permanente
- GEOMETRÍA : Geometría
- FLUJO : flujo

Una vez creada tanto la geometría, el flujo, como el plan, estos se deben guardar en el proyecto HEC-RAS y recién entonces, estarán asociados al proyecto.

A.4 Componentes

El diseño de MR-HR fue pensado en ser lo más intuitivo posible, es por esto que sus componentes se van habilitando uno tras otro, es decir, una vez que se cumpla un requisito de la configuración se habilitara el próximo, hasta la eventual ejecución del programa y la habilitación de los resultados brindados por éste.

A.4.1 Ventana Principal

A continuación se muestra la ventana principal de MR-HR y se enumeran los principales componentes que este programa contiene.

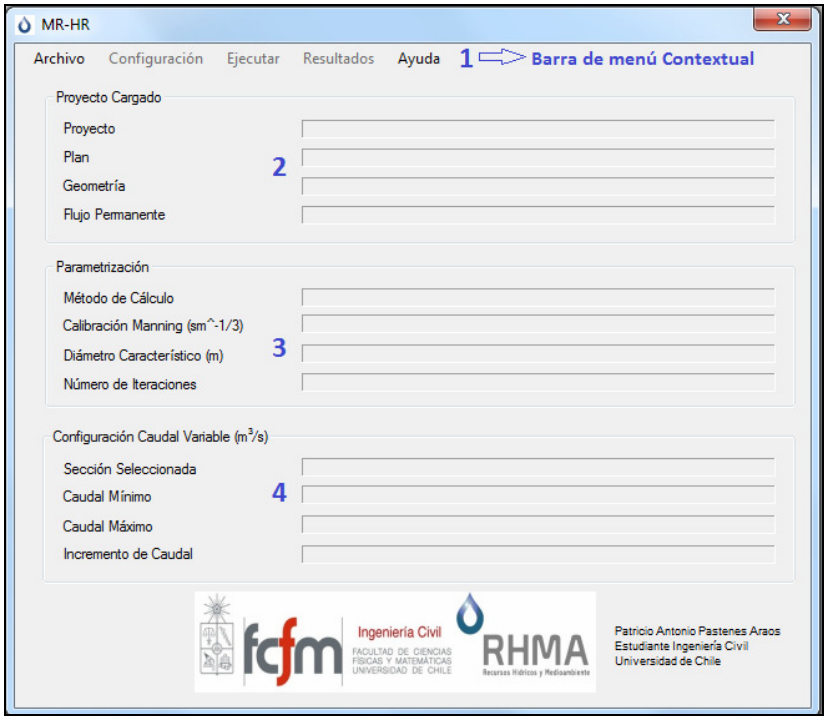


Figura A-8: Ventana Principal de MR-HR.
Fuente: Elaboración Propia

El significado de la numeración descrita en la figura (A-8) se explica a continuación:

1. **Barra de Menú Contextual:** mediante esta barra se importa el proyecto creado en HEC-RAS, se configura la parametrización seleccionada, el o los diámetros característicos, el número de iteraciones que se deseen realizar, se define el o los perfiles de flujo para los cuales se va a iterar, se ejecuta el proyecto una vez configurado, se muestran los resultados y se recurre a ayuda en caso que se requiera. Cada elemento (Archivo / Configuración / Ejecutar / Resultados / Ayuda) despliega un submenú donde se accede a configurar y/o mostrar lo anteriormente señalado.

2. **Proyecto Cargado:** Este cuadro de texto brinda la información del proyecto cargado (importado) de HEC-RAS. Proporciona el nombre del proyecto, plan, geometría y el archivo de flujo asociado. Una vez cargado (importado) el proyecto este cuadro de texto se actualiza automáticamente.

3. **Parametrización:** Este cuadro de texto brinda la información de la configuración referente a la parametrización del número de Strickler seleccionada, el o los diámetros característicos ingresados, el número de iteraciones seleccionado y la calibración del coeficiente de Manning. La calibración del coeficiente de Manning se refiere a un desplazamiento ya sea positivo o negativo de todos los coeficientes de Manning en una determinada magnitud ingresada por el usuario. El objetivo de este parámetro es calibrar los coeficientes de Manning en caso de mucha irregularidad en el cauce, vegetación, obstrucciones, etc., además si se dispone de alturas de escurrimiento medidas en terreno y las parametrizaciones seleccionadas no brindan resultados acordes a los de terreno, entonces la calibración del coeficiente de Manning sumará o restará una magnitud predefinida por el usuario a todos los coeficientes de Manning para intentar ajustar el eje hidráulico a los datos obtenidos en terreno. Mediante se configure el proyecto, el cuadro de texto se irá actualizando constantemente, desplegando la información ingresada por el usuario.

4. **Configuración Caudal Variable:** Este cuadro de texto brinda la información de la configuración referente a el o los perfiles de flujo para los cuales se va a iterar en función del coeficiente de Manning. La sección de cambio de caudal, siempre es la aguas arriba, donde comienza el cauce. Una vez configurado el caudal, este cuadro de texto se actualizara automáticamente.

A.4.2 Submenú Archivo

El submenú archivo es el primer submenú, de izquierda a derecha, que aparece en la barra contextual (ver figura A-8: Ventana Principal de MR-HR). Al hacer click en el submenú archivo se despliegan las opciones:

1. **Cargar Proyecto** : Es donde se importa el proyecto creado en HEC-RAS.
2. **Salir** : Se abandona MR-HR.

Nótese que el submenú Archivo y Ayuda son los únicos habilitados, dado que no tiene sentido configurar un proyecto si antes no ha sido cargado o importado. Lo mismo ocurre con los submenús Ejecutar y Resultados que también carecen de sentido si el proyecto no ha sido cargado o importado.

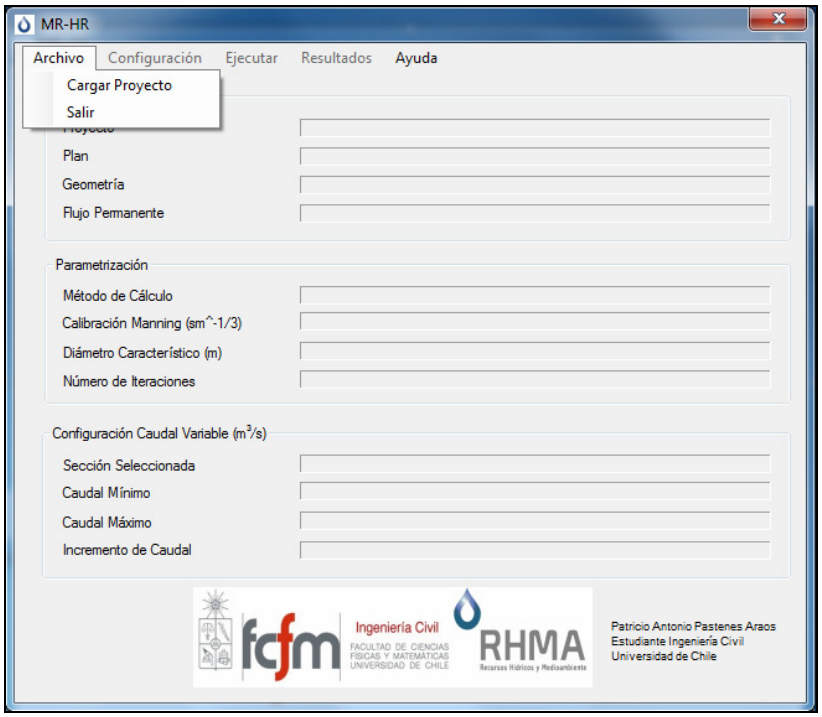


Figura A-9: Submenú Archivo
Fuente: Elaboración Propia

Al hacer click en Cargar Proyecto, MR-HR lanzará el siguiente mensaje: *"Se recomienda guardar y cerrar todas las instancias de HEC-RAS actualmente abiertas, ya que se cerraran automáticamente"*. Esto se debe a que a partir de este punto MR-HR controlará por completo a HEC-RAS y es posible que si no ha guardado algún trabajo este se pierda.

Luego debe navegar hasta seleccionar el proyecto creado en HEC-RAS. Nótese que solo es posible seleccionar archivos *.prj que es la extensión de los proyectos creados en HEC-RAS. La figura (A-10) muestra dicha situación.

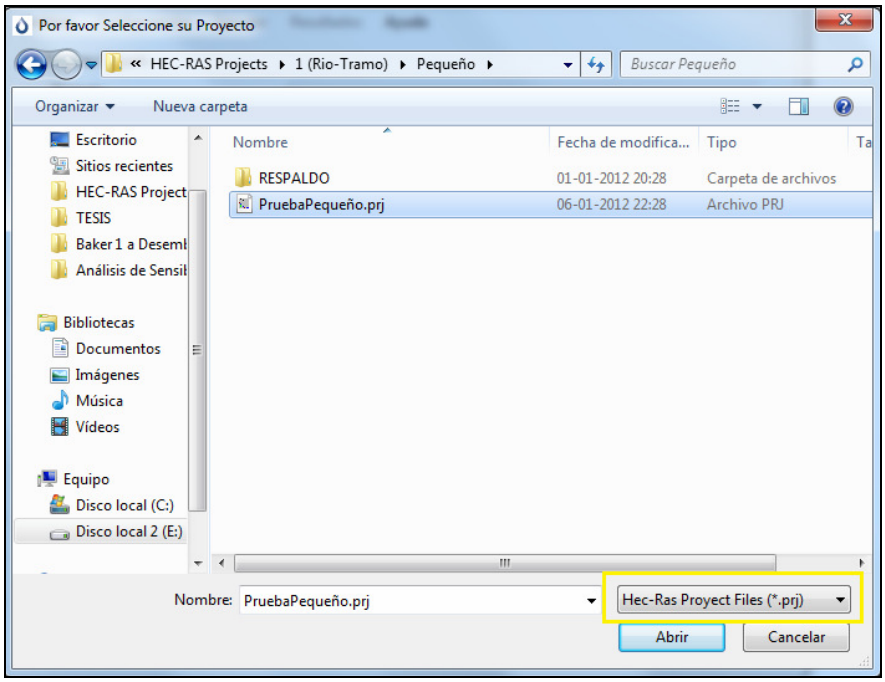


Figura A-10: Importación proyecto creado en HEC-RAS en MR-HR.
Fuente: Elaboración Propia

Una vez importado su proyecto, MR-HR desplegará el siguiente mensaje: *"MR-HR realizará cambios en su proyecto creado en HEC-RAS. Se recomienda crear copias de respaldo de sus archivos"*. Esto se debe a que MR-HR cambiará los perfiles de flujo y coeficientes de Manning a medida que vayan ocurriendo las iteraciones, en el proyecto original importado. La importancia que tiene esto es que una vez finalizados los cálculos, el usuario puede recurrir al proyecto modificado por MR-HR, el cual contendrá la información tanto del flujo como de los coeficientes de Manning de la última iteración. Entonces podrá ejecutarlo normalmente en HEC-RAS y podrá consultar las variables que le parezcan de interés, no consideradas en MR-HR, tales como: el número de Froude, pendientes energéticas, etc.

Finalmente, luego que el proyecto haya sido cargado o importado se actualizará la ventana principal de MR-HR y se habilitará el submenú Configuración de la barra de menú Contextual. Esto se puede apreciar en la figura (A-11).

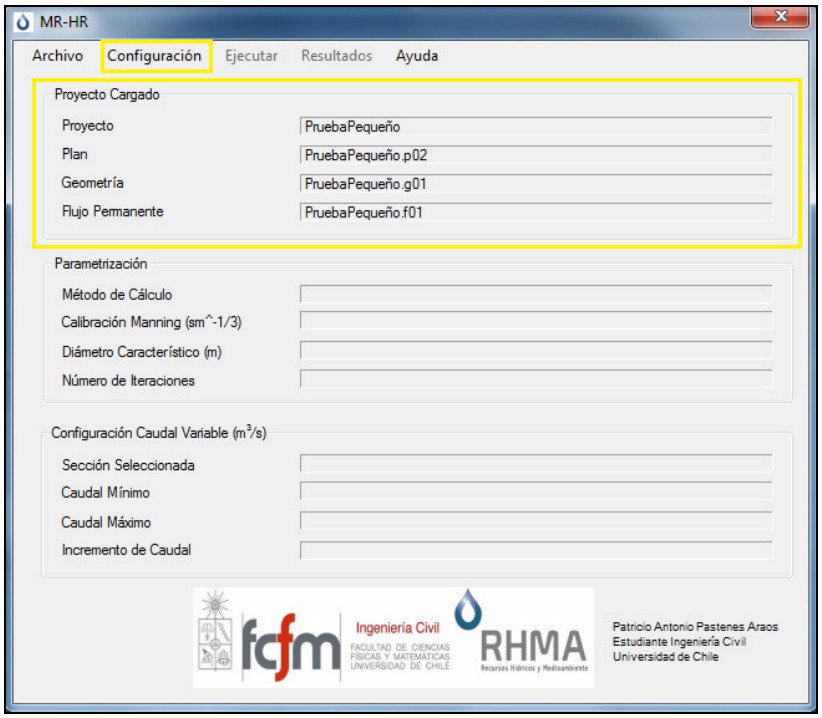


Figura A-11: Actualización de MR-HR una vez cargado (importado) el proyecto de HEC-RAS
Fuente: Elaboración Propia

Nótese de la figura (A-11) que se actualizó el campo Proyecto Cargado, que contiene la información del proyecto importado, además se habilitó el submenú Configuración. Sin embargo, los submenús Ejecutar y Resultados aún aparecen inactivos, dado que no se ha configurado el proyecto en MR-HR, por lo que carece de sentido la Ejecución y también la visualización de Resultados.

A.4.3 Submenú Configuración

Una vez cargado o importado el proyecto, se habilita el submenú Configuración. Este contiene cuatro opciones las cuales son:

4.3.1 Parametrización

4.3.2 Diámetros Característicos

4.3.3 Criterio Convergencia

4.3.4 Caudal Variable

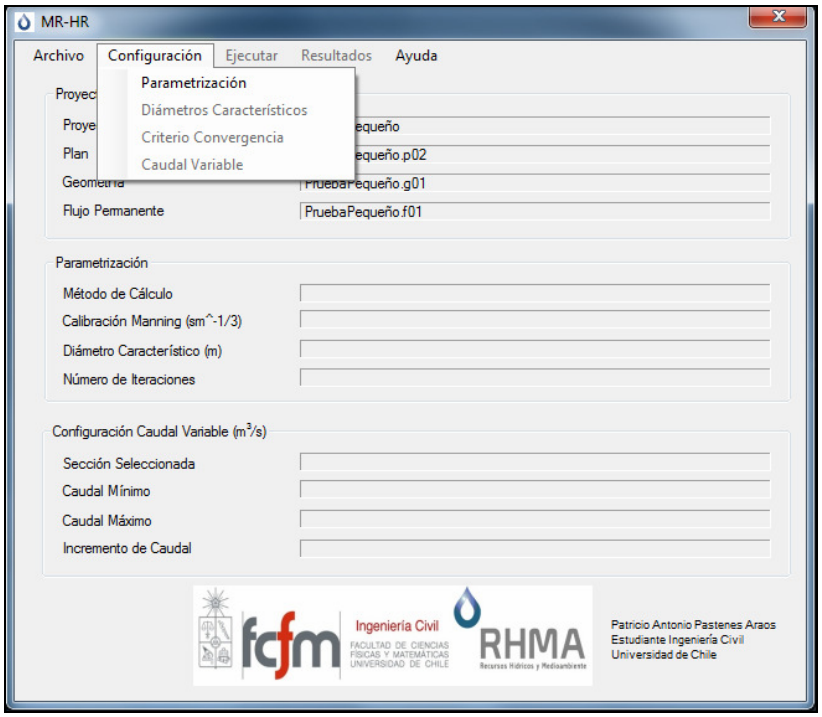


Figura A-12: Submenú Configuración
Fuente: Elaboración Propia

Es posible apreciar de la figura (A-12) que solo la opción Parametrización está disponible. Luego de completada esta opción se irán habilitando sucesivamente: Diámetros Característicos, Criterio de Convergencia y Caudal Variable.

4.3.1 Parametrización

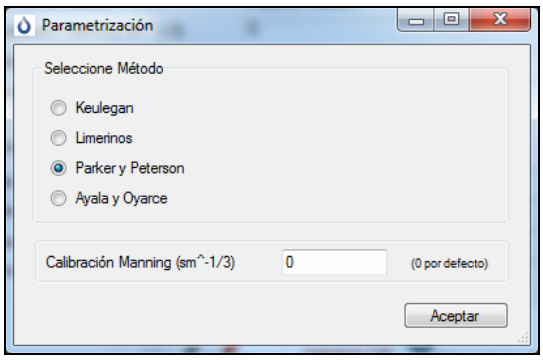


Figura A-13: Submenú Configuración / Parametrización
Fuente: Elaboración Propia

En la figura (A-13) se aprecia que es posible seleccionar la parametrización del número de Strickler deseada, es decir: Keulegan, Limerinos, Parker y Peterson, Ayala y Oyarce. Existe la opción de ingresar una magnitud para calibrar los coeficientes de Manning, denominada Calibración Manning. Esta magnitud puede ser tanto positiva como negativa y tiene como objetivo sumar o restar a todos los coeficientes de Manning una cantidad arbitraria definida por el usuario para ajustar el eje hidráulico. Esto tiene sentido si se tienen mediciones de terreno de alturas de escurrimiento y si ninguna parametrización se ajusta bien a las mediciones de terreno y/o el cauce presenta muchas singularidades, es decir, mucha vegetación, obstrucciones, curvas, etc. El valor por defecto es cero y se debe ser cuidadoso en la magnitud de Calibración ingresada, pues un valor negativo muy pequeño podría tornar los coeficientes de Manning negativos, lo cual carece de sentido físico.

En particular en la figura (A-13) se seleccionó la parametrización de Parker y Peterson con Calibración nula. Una vez configurada la Parametrización se habilita la opción Diámetros Característicos.

4.3.2 Diámetros Característicos

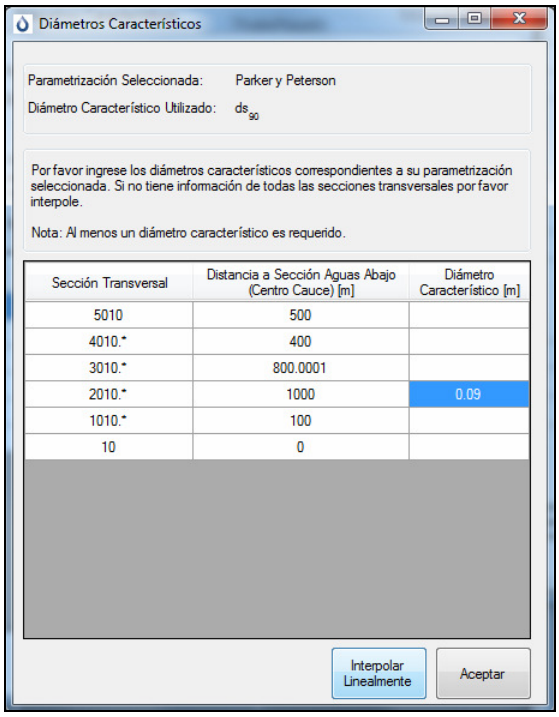


Figura A-14: Configuración / Diámetros Característicos
Fuente: Elaboración Propia

En la figura (A-14) se aprecia que se reconoce previamente la parametrización seleccionada. Se resumen todas las secciones transversales asociadas al proyecto junto con su distancia aguas abajo a la próxima sección transversal medida con respecto al centro del cauce. Además, se tiene la opción de ingresar el diámetro característico de cada sección transversal. Si no se conoce todo el detalle en cada sección transversal, se debe interpolar linealmente. En particular, se ingresó sólo un diámetro característico en la sección transversal 2010.* igual a 0.09 m, al interpolar éste diámetro se convierte en uniforme para todo el resto de las secciones transversales. Una vez configurados los Diámetros Característicos se habilita la opción Criterio de Convergencia.

4.3.3 Criterio de Convergencia

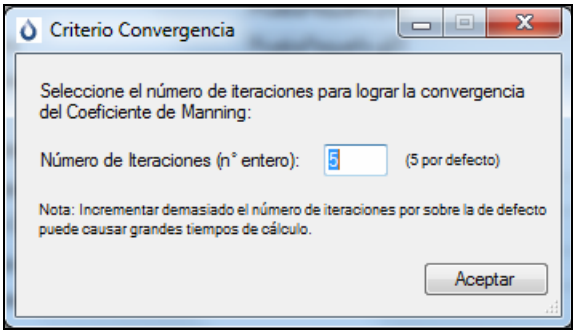


Figura A-15: Submenú Configuración / Criterio de Convergencia
Fuente: Elaboración Propia

En la figura (A-15) se define el número de iteraciones que se realizarán para lograr la convergencia de los coeficientes de Manning, el valor por defecto es 5. Sin embargo, es posible aumentar este número cuanto se desee, pero trae consigo consecuencias en cuanto al tiempo de cálculo. Una vez configurado el Criterio de Convergencia se habilita la opción Caudal Variable.

4.3.3 Caudal Variable

En la figura (A-16) se aprecia que se reconoce automáticamente y no se pueden cambiar el río, el tramo y la sección de aguas arriba donde nace el cauce. En esta sección (aguas arriba) se

realizarán las variaciones de caudal. Abajo se definen el o los perfiles de flujo para los cuales se iterará en función del coeficiente de Manning.

Para definir un único perfil de flujo el Caudal Mínimo debe ser igual al Caudal Máximo y el Incremento de Caudal debe ser cero. Para definir más de un perfil de flujo, el Caudal Mínimo debe ser diferente del Caudal Máximo y el incremento de Caudal debe ser distinto de cero.

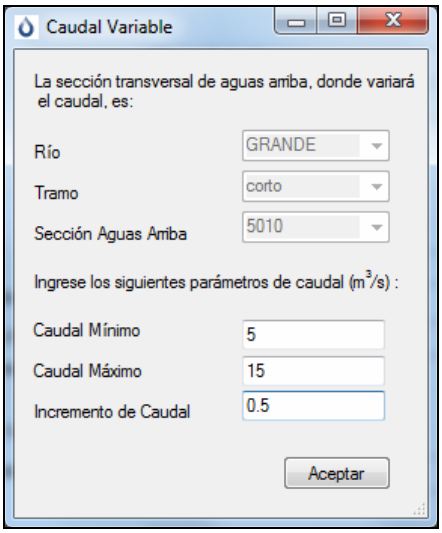


Figura A-16: Submenú Configuración / Caudal Variable
Fuente: Elaboración Propia

En particular, en la figura (A-16) se observa que se definió: Caudal Mínimo 5 m^3/s, Caudal Máximo 15 m^3/s e incremento de Caudal 0.5 m^3/s. Esto quiere decir que se realizaran 21 perfiles de flujo comenzando desde el caudal 5 m^3/s, en la sección de aguas arriba donde nace el cauce, incrementándose en 0.5 m^3/s hasta llegar a los 15 m^3/s.

Una vez completada toda la configuración, la ventana principal de MR-HR se actualizara con los datos ingresados y se habilitara el submenú Ejecutar. Esto se aprecia en la figura (A-17).

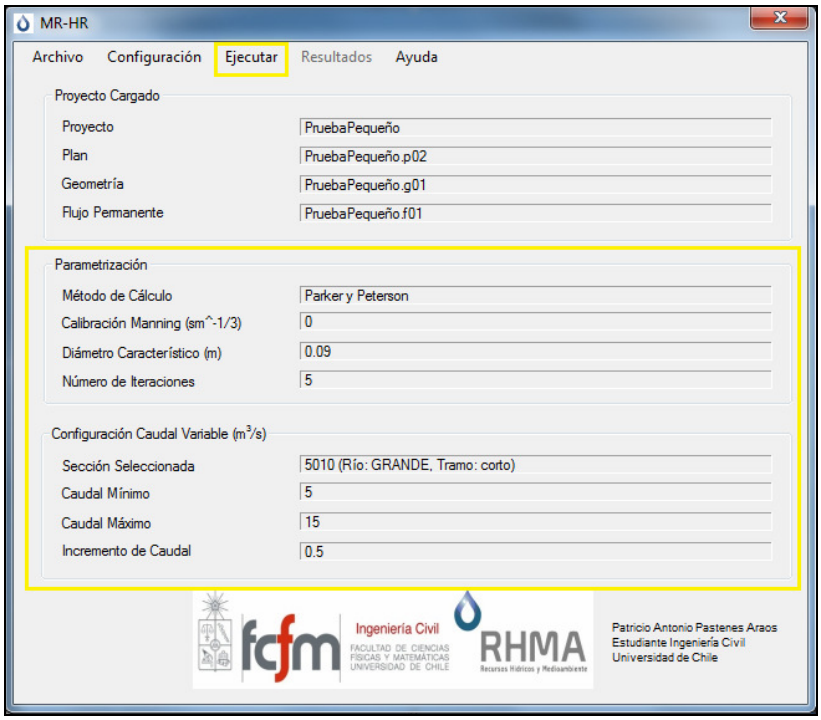


Figura A-17: Configuración Finalizada
Fuente: Elaboración Propia

A.4.4 Submenú Ejecutar

Una vez configurado por completo el proyecto en MR-HR se habilita el submenú Ejecutar. Al hacer click en este submenú MR-HR preguntará donde desea guardar los resultados. Luego comienza el proceso de cálculo.

En la figura (A-18) es posible apreciar la ventana Cálculos, la cual indica el progreso en porcentaje de los cálculos totales que se deben realizar. Una vez finalizada la ejecución, es decir, progreso igual al 100%, entonces se habilita el submenú Resultados. Nótese que anteriormente ya se decidió en que lugar quedarían guardados los resultados. Estos resultados están en formato de texto plano (*.txt) y contienen toda la memoria de cálculo realizada por MR-HR en conjunto con HEC-RAS.

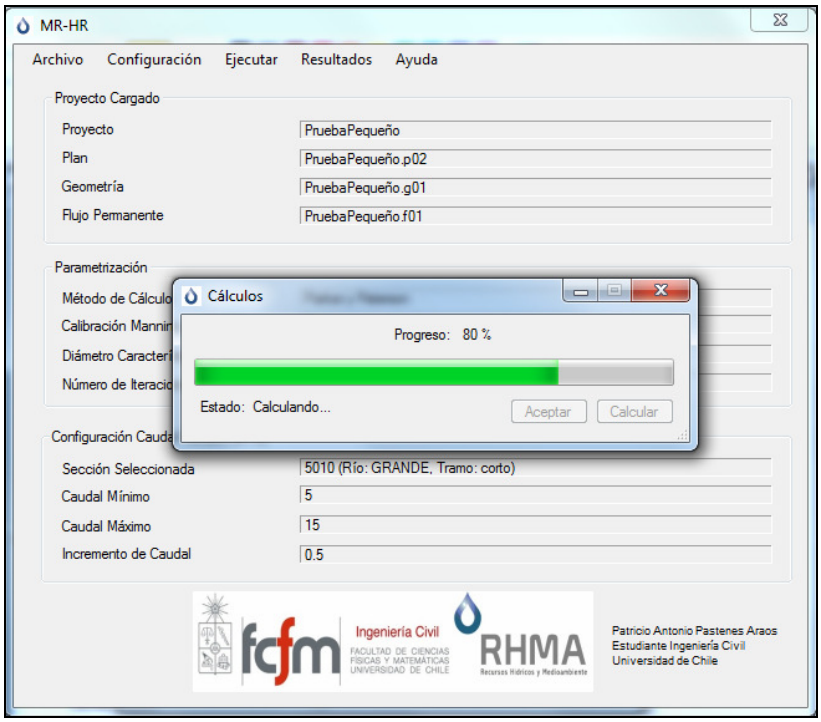


Figura A-18: MR-HR Ejecutándose
Fuente: Elaboración Propia

A.4.5 Submenú Resultados

Una vez finalizados los cálculos se habilita el submenú Resultados. En este se despliega otro submenú que contiene tanto resultados numéricos como gráficos. En la siguiente figura se aprecia esto.

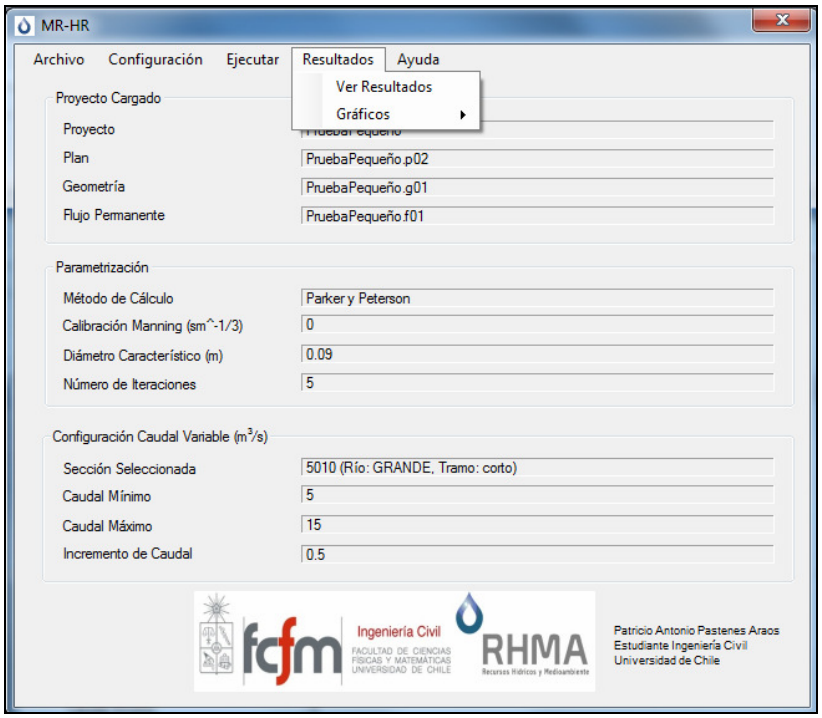


Figura A-19: Submenú Resultados
Fuente: Elaboración Propia

En la figura (A-19) se puede apreciar dos opciones pertenecientes al submenú Resultados, estas son:

1. **Ver Resultados** : Esta opción muestra los resultados numéricos, tanto de la última iteración como de toda la memoria de cálculo realizada.

2. **Gráficos** : Esta opción despliega gráficos de alturas de escurrimiento, velocidad promedio en el canal y coeficientes de Manning vs. Caudales. Cada gráfico es referente a una sección transversal particular seleccionada por el usuario.

1. **Ver Resultados**

La opción Ver Resultados, contiene los resultados numéricos realizados por MR-HR. Se puede escoger entre desplegar los resultados de la última iteración para cada caudal o desplegar

los resultados completos donde se incluye toda la memoria de cálculo. Esto se muestra en la figura (A-20).

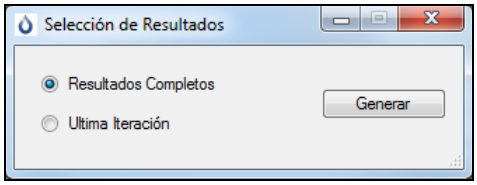
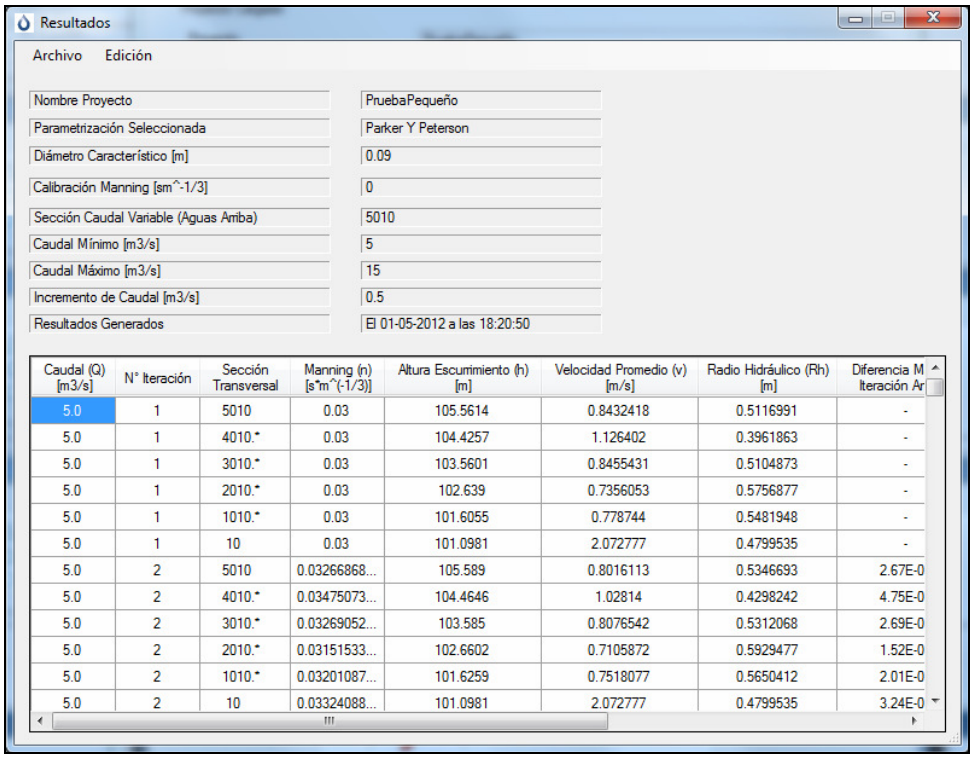


Figura A-20: Submenú Resultados / Ver Resultados
Fuente: Elaboración Propia

Independientemente de la opción seleccionada, es decir, Resultados Completos o Ultima Iteración, las variables que se despliegan son las mismas. Estas son:

- Caudal [m3/s]
- N° Iteración
- Sección Transversal
- Manning [$s*m^{-1/3}$]
- Altura de Escurrimiento [m]
- Velocidad Promedio [m/s]
- Radio Hidráulico [m]
- Diferencia Manning con respecto a la iteración anterior
- N° de Strickler
- Inverso Rugosidad Relativa (R_h/d_s)
- Diámetro Característico

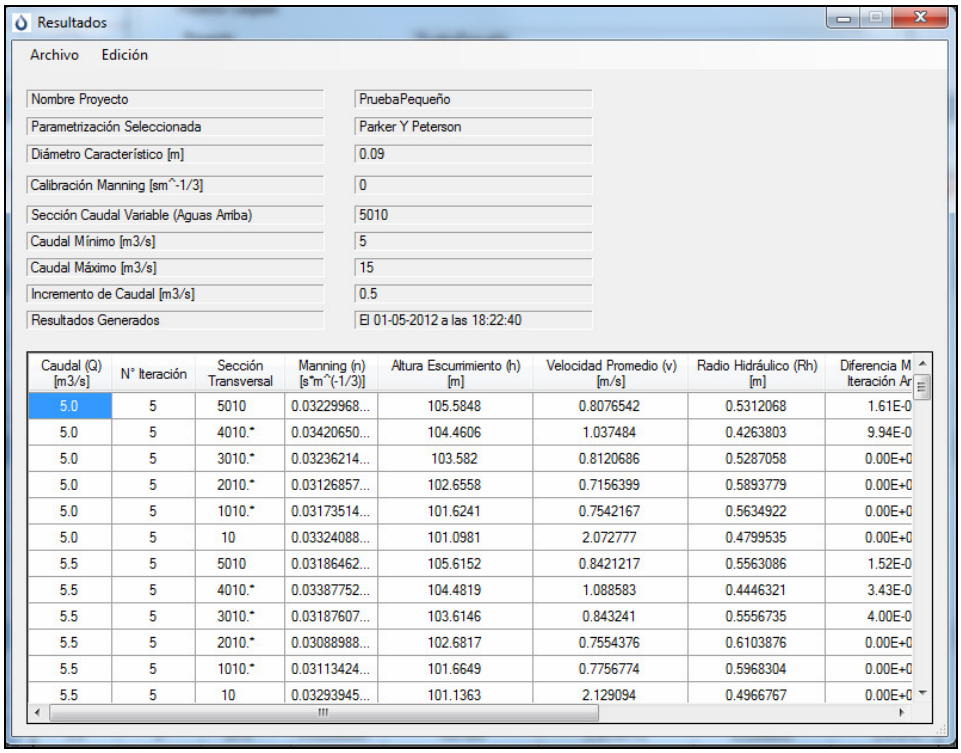
En las figuras (A-21) y (A-22) se muestran las opciones de Resultados Completos y Ultima Iteración, respectivamente:



Caudal (Q) [m3/s]	N° Iteración	Sección Transversal	Manning (n) [s*m^(-1/3)]	Altura Escurrimiento (h) [m]	Velocidad Promedio (v) [m/s]	Radio Hidráulico (Rh) [m]	Diferencia M Iteración Ar
5.0	1	5010	0.03	105.5614	0.8432418	0.5116991	-
5.0	1	4010.*	0.03	104.4257	1.126402	0.3961863	-
5.0	1	3010.*	0.03	103.5601	0.8455431	0.5104873	-
5.0	1	2010.*	0.03	102.639	0.7356053	0.5756877	-
5.0	1	1010.*	0.03	101.6055	0.778744	0.5481948	-
5.0	1	10	0.03	101.0981	2.072777	0.4799535	-
5.0	2	5010	0.03266868...	105.589	0.8016113	0.5346693	2.67E-0
5.0	2	4010.*	0.03475073...	104.4646	1.02814	0.4298242	4.75E-0
5.0	2	3010.*	0.03269052...	103.585	0.8076542	0.5312068	2.69E-0
5.0	2	2010.*	0.03151533...	102.6602	0.7105872	0.5929477	1.52E-0
5.0	2	1010.*	0.03201087...	101.6259	0.7518077	0.5650412	2.01E-0
5.0	2	10	0.03324088...	101.0981	2.072777	0.4799535	3.24E-0

Figura A-21: Submenú Resultados / Ver Resultados / Resultados Completos

Fuente: Elaboración Propia



Caudal (Q) [m3/s]	N° Iteración	Sección Transversal	Manning (n) [s*m^(-1/3)]	Altura Escurrimiento (h) [m]	Velocidad Promedio (v) [m/s]	Radio Hidráulico (Rh) [m]	Diferencia M Iteración Ar
5.0	5	5010	0.03229968...	105.5848	0.8076542	0.5312068	1.61E-0
5.0	5	4010.*	0.03420650...	104.4606	1.037484	0.4263803	9.94E-0
5.0	5	3010.*	0.03236214...	103.582	0.8120686	0.5287058	0.00E+0
5.0	5	2010.*	0.03126857...	102.6558	0.7156399	0.5893779	0.00E+0
5.0	5	1010.*	0.03173514...	101.6241	0.7542167	0.5634922	0.00E+0
5.0	5	10	0.03324088...	101.0981	2.072777	0.4799535	0.00E+0
5.5	5	5010	0.03186462...	105.6152	0.8421217	0.5563086	1.52E-0
5.5	5	4010.*	0.03387752...	104.4819	1.088583	0.4446321	3.43E-0
5.5	5	3010.*	0.03187607...	103.6146	0.843241	0.5556735	4.00E-0
5.5	5	2010.*	0.03088988...	102.6817	0.7554376	0.6103876	0.00E+0
5.5	5	1010.*	0.03113424...	101.6649	0.7756774	0.5968304	0.00E+0
5.5	5	10	0.03293945...	101.1363	2.129094	0.4966767	0.00E+0

Figura A-22: Submenú Resultados / Ver Resultados / Ultima Iteración
Fuente: Elaboración Propia

De la figura (A-21) se puede apreciar que muestra todas las iteraciones para cada uno de los caudales definidos en los perfiles. Esto se puede apreciar para el caudal 5 m^3/s y N° de iteración, dado que parte desde la primera iteración hasta la quinta (recordar que como criterio de convergencia se seleccionaron 5 iteraciones por caudal). La ventaja de esto es que se puede apreciar como fueron evolucionando o convergiendo los coeficientes de Manning.

De la figura (A-22) solo se aprecia la última iteración para cada caudal, es decir, la iteración número 5. Si bien no se aprecia la evolución de los coeficientes de Manning, la columna que representa la diferencia con respecto al Manning de la iteración anterior, brinda la información necesaria para saber si convergieron o no los Manning. En caso que la diferencia con respecto a los Manning anteriores sea demasiado grande, se sugiere aumentar el número de iteraciones. Además existen opciones de copiar la información total o parcialmente al portapapeles o exportarla en formato de texto plano (*.txt).

Es posible que en algunos casos la información no pueda ser desplegada en pantalla dada la gran extensión que esta podría representar. Esto podría provocar que la memoria disponible del computador no de abasto para desplegar toda la información. Es por esto que, anteriormente, cuando se realizan los cálculos, MR-HR pregunta donde quiere guardar los resultados en formato de texto plano (*.txt). Si bien no es posible desplegar toda la información en pantalla el archivo de texto puede ser manipulado con softwares como Matlab y Excel para generar gráficas o lo que quiera el usuario.

2. Gráficos

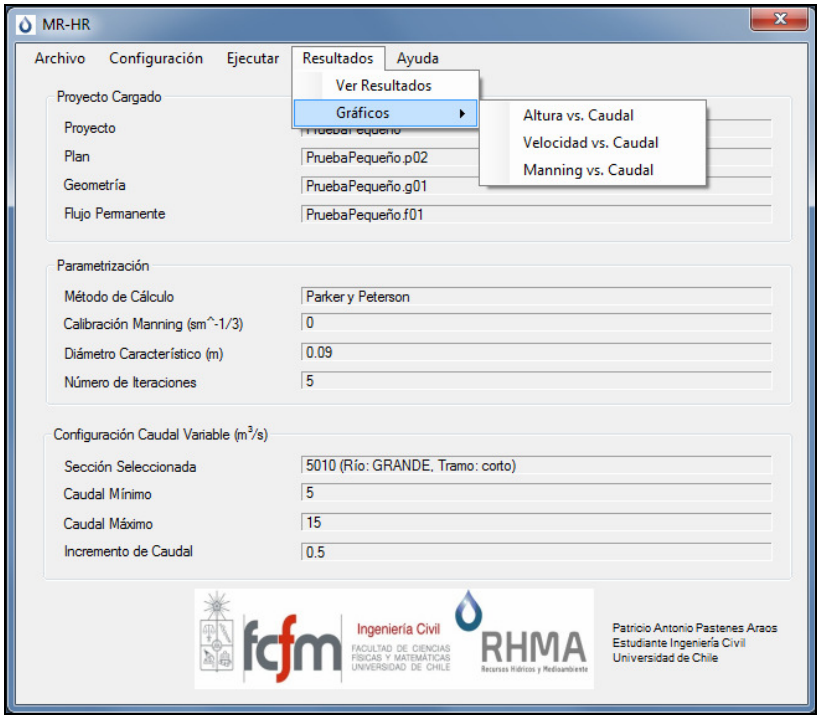


Figura A-23: Submenú Resultados / Gráficos
Fuente: Elaboración Propia

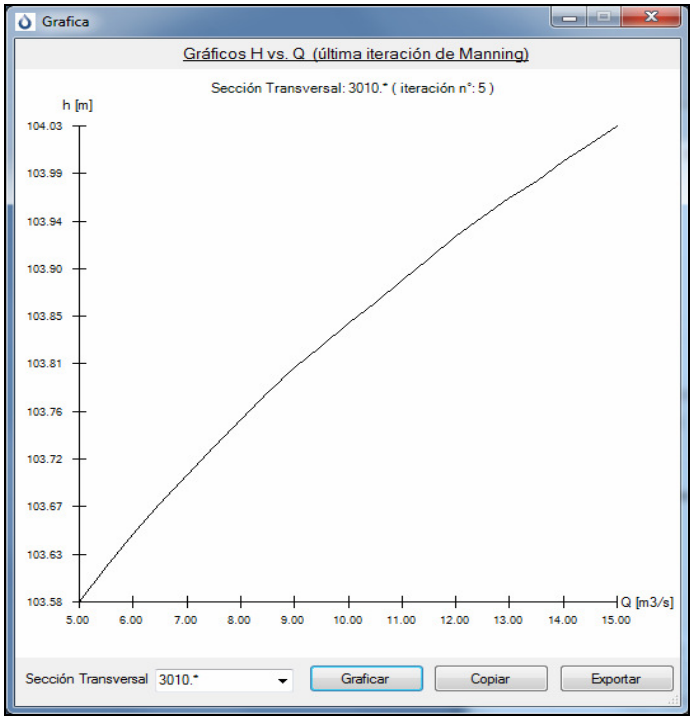


Figura A-24: Gráfica H vs. Q sección 3010.*
Fuente: Elaboración Propia

El gráfico de la figura (A-24) proviene del submenú Resultados / Gráficos / Altura vs. Caudal, figura (A-23). Para generar el gráfico se debe seleccionar la sección transversal que se desea graficar, en este caso 3030.*, luego se hace click en Graficar y se despliega la gráfica mostrada en la figura (A-24). El procedimiento es análogo para las gráficas de Velocidad vs. Caudal y Manning vs. Caudal.

Además de desplegar los gráficos en pantalla, MR-HR cuanta con otras opciones, las cuales son:

1. **Copiar** : Copia el gráfico al portapapeles para luego pegarlo en otro programa.
2. **Exportar** : Exporta la imagen en formato de mapa de bits (*.bmp).

Es interesante notar, que si en la configuración de Caudal Variable perteneciente al submenú Configurar, se seleccionó solo 1 perfil de flujo, es decir, solo un caudal, estos gráficos estarán deshabilitados dado que son en función del caudal.

A.4.6 Submenú Ayuda

El submenú Ayuda consta con las opciones de: Manual de Uso y Acerca de. Esto se muestra en la siguiente figura.

Figura A-25: Submenú Ayuda
Fuente: Elaboración propia

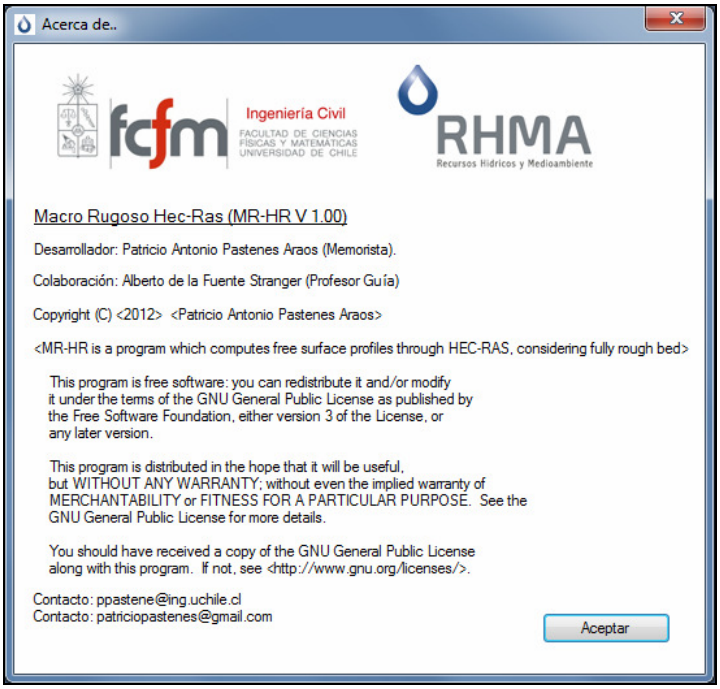


Figura A-26: Submenú Ayuda / Acerca de..
Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar de la figura (A-26), la opción Acerca de.. muestra información referente al desarrollo de MR-HR, los derechos de autor y la información de contacto en caso que se requiera.

La opción Manual de Uso, hace referencia a este Manual ejecutándolo en un lector de archivos PDF.

A.5 Ejemplo de Cálculo de MR-HR

En esta sección se muestra como MR-HR realiza los cálculos, lo cual puede ser de especial interés en caso de querer verificar sus resultados. Para esto se utilizó un ejemplo sencillo adjunto en el Anexo (B.4). Este ejemplo, llamado PruebaPequeño.prj, consta con 6 secciones transversales, las cuales se muestra en la siguiente Figura:

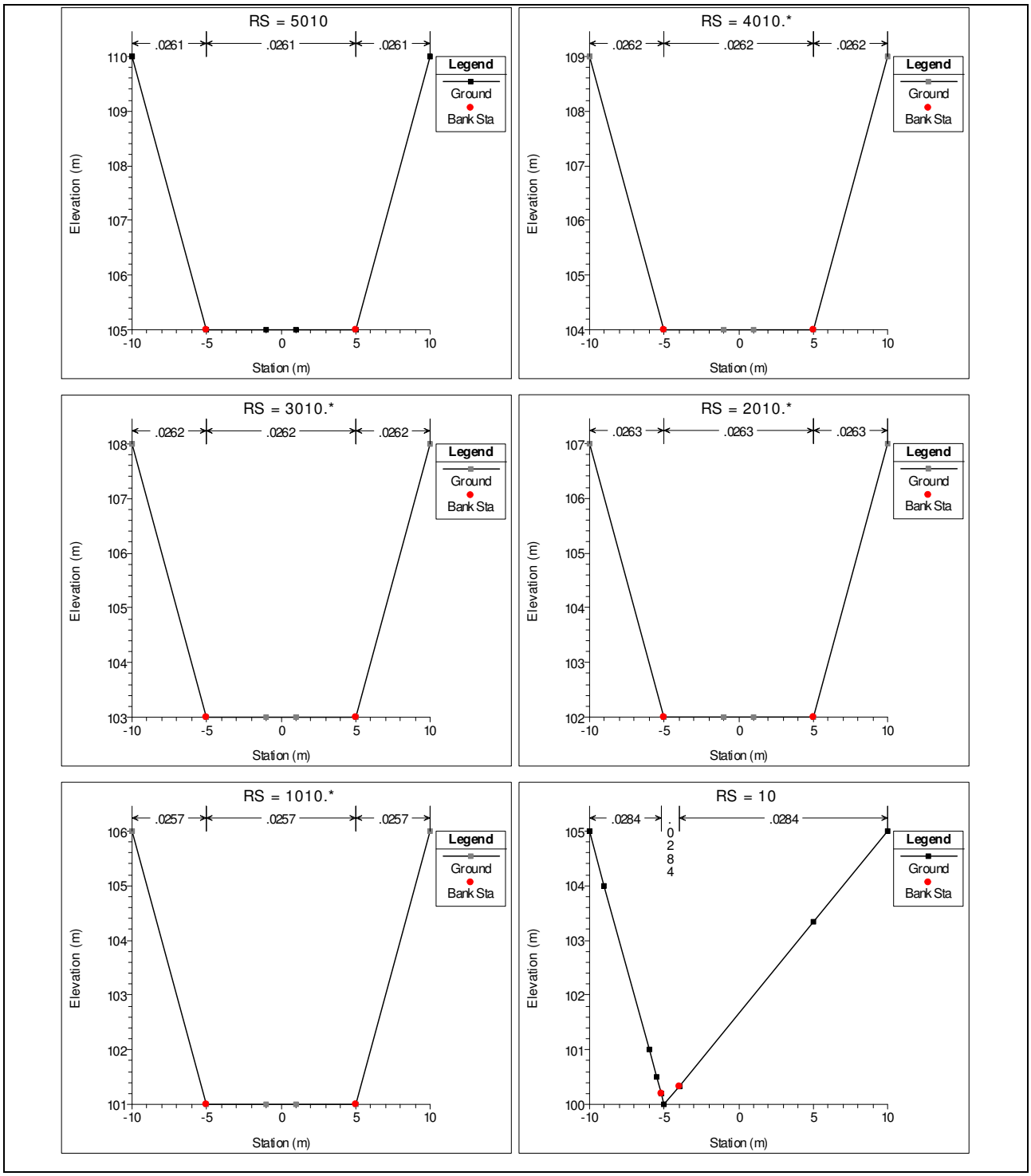


Figura A-27: Secciones Transversales Utilizadas en Ejemplo
Fuente: Elaboración propia

De la figura (A-27) se puede apreciar las 6 secciones transversales, de las cuales 5 son trapezoidales. Esto se realizó por simplicidad, sin embargo, la forma de las secciones transversales no es un impedimento para la ejecución de MR-HR. El orden de las secciones transversales desde aguas arriba hacia aguas abajo son: 5010, 4010.*, 3010.*, 2010.*, 1010.*, 10. En la figura (A-28) se muestra un esquema del orden de las secciones transversales.

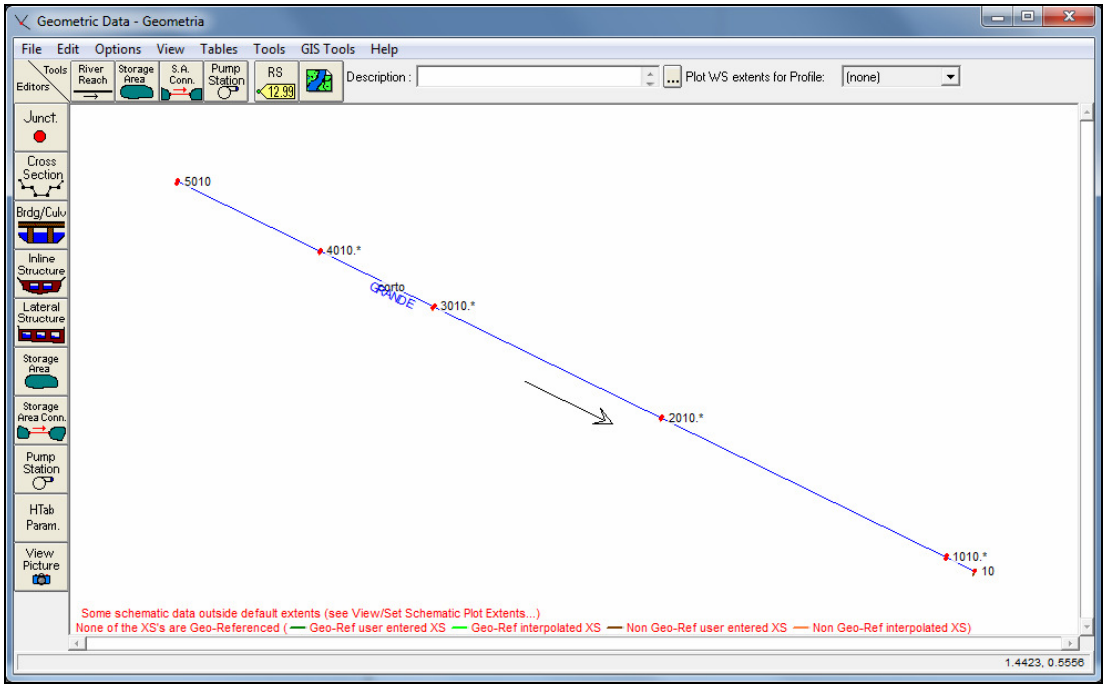


Figura A-28: Esquema de Orden de las Secciones Transversales Utilizadas en Ejemplo
Fuente: Elaboración propia

La condición de borde impuesta aguas abajo es la de altura crítica y el régimen del flujo es Subcrítico. Para más información consultar el Anexo (B.4).

El resumen de la configuración utilizada en MR-HR, se muestra en la figura (A-29).

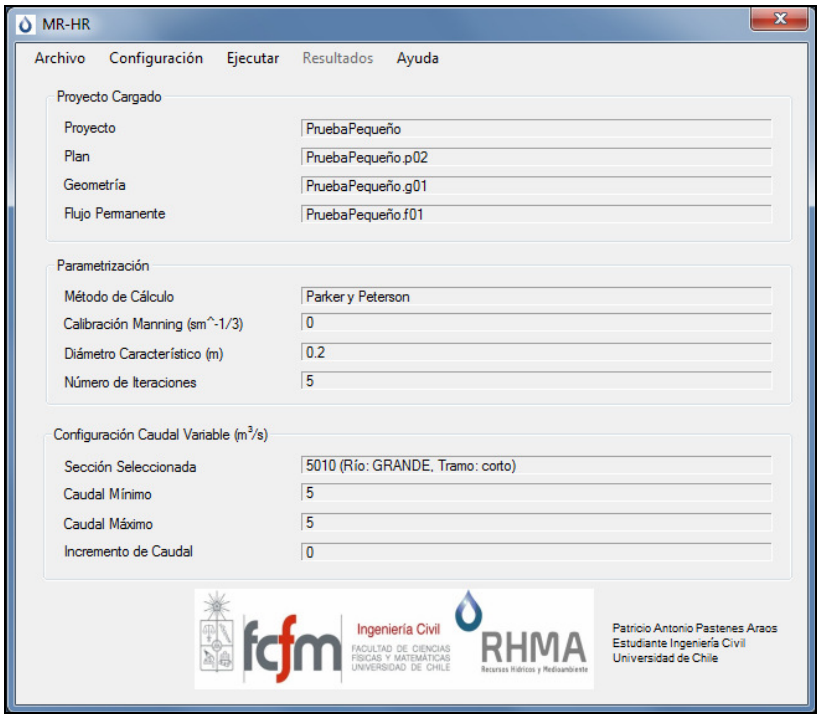


Figura A-29: Resumen Configuración del Ejemplo en MR-HR.
Fuente: Elaboración propia

Nótese que la configuración seleccionada fue Parker y Peterson, por ende la parametrización del número de Strickler corresponde a la siguiente ecuación:

$$S_t\left(\frac{R_h}{d_s}\right)\Bigg|_{Parker\ y\ Peterson} = \begin{cases} 0.2384540377 & R_h/d_s \le 1 \\ \dfrac{\left(\dfrac{R_h}{d_s}\right)^{1/6}}{2.46\cdot\ln\left(5.5\cdot\dfrac{R_h}{d_s}\right)} & 1 < R_h/d_s \le 3.675 \\ -0.0075859332\cdot R_h + 0.1959000000 & 3.675 < R_h/d_s \le 8 \\ 0.0009507844\cdot R_h^{\,2} - 0.0228188111\cdot R_h + 0.2569128667 & 8 < R_h/d_s \le 12 \\ 0.12 & R_h/d_s > 12 \end{cases} \tag{A-1}$$

Los resultados brindados por MR-HR se muestran en la siguientes tablas:

Tabla A-1: Resultados 1ra Iteración

Caudal (Q) [m3/s]	N° Iteración	Sección Transversal	Manning (n) [s*m^(-1/3)]	Altura Escurrimiento (h) [m]	Velocidad Promedio (v) [m/s]	Radio Hidráulico (Rh) [m]	Diferencia Manning Iteración Anterior	N° Strickler	Rh/ds	ds [m]
5	1	5010	0.03	105.5614	0.8432418	0.5116991	-	-	2.558	0.2
5	1	4010.*	0.03	104.4257	1.126402	0.3961863	-	-	1.980	0.2
5	1	3010.*	0.03	103.5601	0.8455431	0.5104873	-	-	2.552	0.2
5	1	2010.*	0.03	102.639	0.7356053	0.5756877	-	-	2.878	0.2
5	1	1010.*	0.03	101.6055	0.778744	0.5481948	-	-	2.740	0.2
5	1	10	0.03	101.0981	2.072777	0.4799535	-	-	2.399	0.2

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla (A-1) se puede apreciar que en la primera iteración todos los coeficientes de Manning son constantes e iguales a 0.030 $sm^{-1/3}$ (este valor es típico de cauces naturales de granulometrías gravosas y siempre el mismo para comenzar las iteraciones). En base a esto MR-HR ejecuta HEC-RAS y obtiene el eje hidráulico asociado a estos coeficientes de Manning junto con sus respectivos radios hidráulicos, para luego calcular el inverso de la rugosidad relativa resultante, R_h/d_s. Luego, con los resultados de los inversos de la rugosidad relativa de la primera iteración es posible calcular los coeficientes de Strickler mediante la ayuda de la ecuación (A-1). Nótese que los números de Strickler diferirán entre secciones transversales dado que los inversos de rugosidades relativas asociados a cada sección son distintos. Por lo tanto, una vez calculados los números de Strickler, es posible calcular los coeficientes de Manning asociados a cada sección transversal mediante la ecuación (2.4), la cual es:

$$S_t = \frac{\sqrt{g} \cdot n}{d_s^{1/6}}$$

Despejando "n" (el coeficiente de Manning) de la ecuación (2.4) es posible calcular los nuevos coeficientes de Manning asociados a la segunda iteración de MR-HR. Con estos nuevos coeficientes, MR-HR los ingresa a HEC-RAS para el cálculo del eje hidráulico y sus respectivos radios hidráulicos, para volver a calcular los inversos de la rugosidad relativa asociados a cada sección transversal. Esto se muestra en la tabla (A-2).

Tabla A-2: Resultados 2da Iteración

Caudal (Q) [m3/s]	N° Iteración	Sección Transversal	Manning (n) [s*m^(-1/3)]	Altura Escurrimiento (h) [m]	Velocidad Promedio (v) [m/s]	Radio Hidráulico (Rh) [m]	Diferencia Manning Iteración Anterior	N° Strickler	Rh/ds	ds [m]
5	2	5010	0.0439203	105.6918	0.6759859	0.6186205	1.39E-02	0.17979324	3.093	0.2
5	2	4010.*	0.04659544	104.5605	0.8446297	0.5109695	1.66E-02	0.19074426	2.554	0.2
5	2	3010.*	0.04394235	103.6999	0.6677873	0.6250367	1.39E-02	0.17988352	3.125	0.2
5	2	2010.*	0.04288051	102.8012	0.5778531	0.7054375	1.29E-02	0.17553673	3.527	0.2
5	2	1010.*	0.04329935	101.7112	0.6563797	0.634192	1.33E-02	0.17725129	3.170	0.2
5	2	10	0.04453265	101.0981	2.072777	0.4799535	1.45E-02	0.18229994	2.399	0.2

Fuente: Elaboración Propia

Con los nuevos inversos de rugosidades relativas se procede en forma análoga hasta completar las iteraciones totales definidas anteriormente, en este caso son 5.

Tabla A-3: Resultados 3ra, 4ta y 5ta Iteración

Caudal (Q) [m3/s]	N° Iteración	Sección Transversal	Manning (n) [s*m^(-1/3)]	Altura Escurrimiento (h) [m]	Velocidad Promedio (v) [m/s]	Radio Hidráulico (Rh) [m]	Diferencia Manning Iteración Anterior	N° Strickler	Rh/ds	ds [m]
5	3	5010	0.04229619	105.6752	0.6936757	0.6052205	1.62E-03	0.17314473	3.026	0.2
5	3	4010.*	0.04393357	104.5423	0.8744072	0.4957663	2.66E-03	0.17984754	2.478	0.2
5	3	3010.*	0.04221528	103.6836	0.6847824	0.6118829	1.73E-03	0.17281353	3.059	0.2
5	3	2010.*	0.04131748	102.7844	0.591127	0.692274	1.56E-03	0.16913825	3.461	0.2
5	3	1010.*	0.04210247	101.705	0.6625214	0.6292295	1.20E-03	0.1723517	3.146	0.2
5	3	10	0.04453265	101.0981	2.072777	0.4799535	0.00E+00	0.18229994	2.399	0.2
5	4	5010	0.04247028	105.6773	0.6913764	0.6069289	1.74E-04	0.17385741	3.034	0.2
5	4	4010.*	0.04421835	104.544	0.8714683	0.4972261	2.85E-04	0.18101333	2.486	0.2
5	4	3010.*	0.04238284	103.6848	0.6835253	0.6128367	1.68E-04	0.17349945	3.064	0.2
5	4	2010.*	0.04145128	102.7852	0.5904808	0.6929033	1.34E-04	0.169686	3.464	0.2
5	4	1010.*	0.04216324	101.705	0.6625214	0.6292295	6.08E-05	0.17260048	3.146	0.2
5	4	10	0.04453265	101.0981	2.072777	0.4799535	0.00E+00	0.18229994	2.399	0.2
5	5	5010	0.04244769	105.677	0.6916391	0.6067333	2.26E-05	0.17376493	3.033	0.2
5	5	4010.*	0.04419029	104.5435	0.8723464	0.496789	2.81E-05	0.18089846	2.483	0.2
5	5	3010.*	0.04237047	103.6848	0.6835253	0.6128367	1.24E-05	0.17344879	3.064	0.2
5	5	2010.*	0.04144478	102.7852	0.5904808	0.6929033	6.50E-06	0.16965938	3.464	0.2
5	5	1010.*	0.04216324	101.705	0.6625214	0.6292295	0.00E+00	0.17260048	3.146	0.2
5	5	10	0.04453265	101.0981	2.072777	0.4799535	0.00E+00	0.18229994	2.399	0.2

Fuente: Elaboración Propia

De la tabla (A-3) se puede apreciar que para la última iteración, la número 5, las diferencias entre los coeficientes de Manning de las iteraciones 4 y 5 difieren entre el 5to y 6to decimal. Si se busca mayor precisión o no se está satisfecho con esas diferencias, es posible aumentar el número de iteraciones para lograr minimizar dichas diferencias.

A.6 Errores Conocidos

El único error registrado de MR-HR a ocurrido a nivel de **ejecución del código fuente a través del compilador de Visual Basic** y no desde el archivo ejecutable (*.exe). Este error se muestra en la figura (A-30) a continuación:

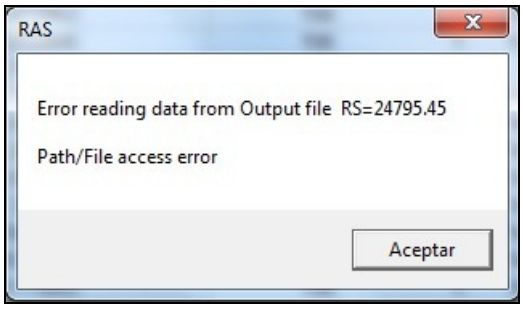


Figura A-30: Error Asociado a Lectura de Archivos de Salida de HEC-RAS
Fuente: Elaboración Propia

El error registrado en la figura (A-30) tiene relación con la lectura del archivo de salida generado por HEC-RAS. Esto, probablemente, ocurre por conflictos de lectura de archivos de Windows. Sin embargo, el programa MR-HR no arroja ningún error, puesto que este error se genera fuera del código fuente de MR-HR, es decir, dentro de HEC-RAS. Se vuelve a reiterar, que este error ha sido registrado a nivel de ejecución del código fuente a través del compilador de Visual Basic y no desde al archivo ejecutable (*.exe). Para su solución, basta con re compilar el código fuente y se evita el error.

Anexo B. Archivos Digitales

Dada la gran extensión de resultados generados por MR-HR, tanto como la escritura del código fuente, no es factible agregarlo en papel. Es por esto que se adjunta, en el final de esta memoria[10], un DVD-ROM con dicha información. La estructura del DVD-ROM se muestra en la figura (B-1).

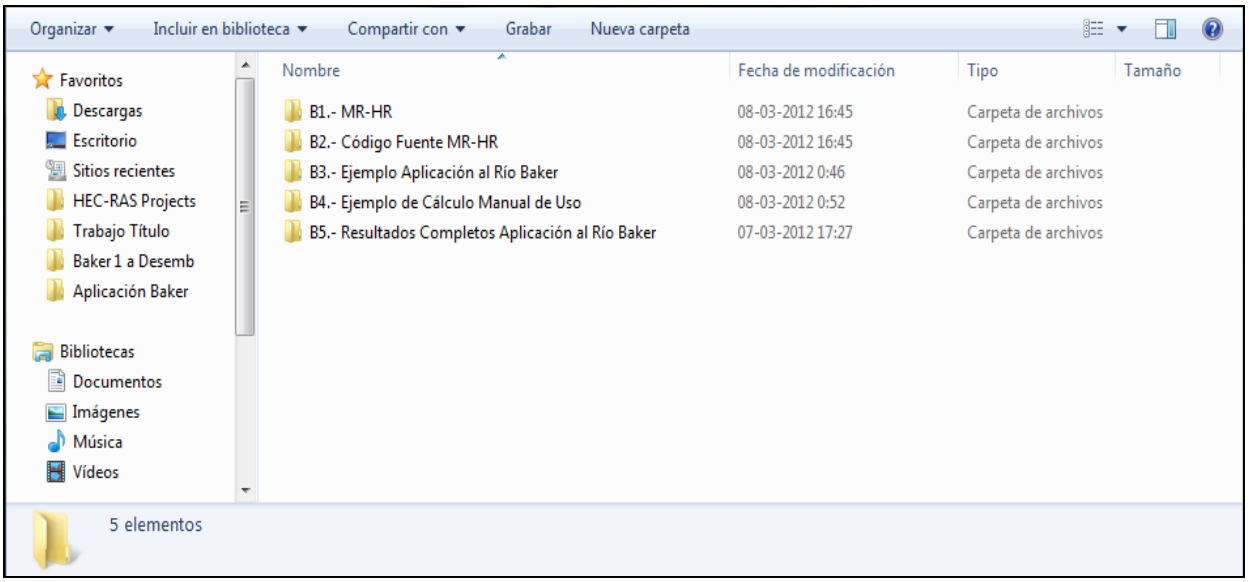


Figura B-1: Contenido DVD-ROM con archivos digitales
Fuente: Elaboración Propia

Se aprecia de la figura (B-1) que dentro del DVD-ROM existen 5 carpetas con los prefijos B1, B2, B3, B4 y B5. El contenido de estas carpetas se detalla a continuación:

B.1 MR-HR

Esta carpeta contiene en su interior el programa MR-HR.

B.2 Código Fuente MR-HR

Esta carpeta contiene en su interior el código fuente de MR-HR. Este fue programado en Visual Basic Express 2010. Sin embargo el código se puede leer con cualquier editor de texto.

[10] Los archivos Digitales están también disponibles en el enlace: http://www.ingcivil.uchile.cl/rhma/?page_id=1051

B.3 Ejemplo Aplicación al Río Baker

Esta carpeta contiene en su interior el proyecto HEC-RAS con el cual se realizó la aplicación al río Baker. Aquí se puede consultar variables que no considera MR-HR, tanto como la geometría de cada una de las secciones transversales (740 en total).

B.4 Ejemplo de Cálculo Manual de Uso

Esta carpeta contiene en su interior el proyecto HEC-RAS con el cual se realizó la sección (A.5), es decir, el ejemplo de cálculo de MR-HR.

B.5 Resultados Completos Aplicación al Río Baker

Los resultados completos generados por MR-HR, son archivos de texto plano (*.txt) y tienen la siguiente estructura:

[Parametrización] [Río] [Diámetro Característico Utilizado].[txt]

Por ejemplo, el archivo que contiene los resultados completos del río Baker, utilizando el diámetro característico máximo y la parametrización de Limerinos, tiene por nombre:

Limerinos Baker MAX.txt

Los archivos de video que dan cuenta de la evolución espacial del número de Strickler en función del caudal son:

- Variación Strickler Tramo Completo.avi: Muestra la variación espacial del coeficiente de Strickler en función del caudal, desde 1 m^3/s a 50 m^3/s, con un paso de 1 m^3/s y para todo el tramo del río Baker estudiado.

- Variación Strickler Tramo Particular.avi: Muestra la variación espacial del coeficiente de Strickler en función del caudal, desde 1 m^3/s a 50 m^3/s, con un paso de 1 m^3/s y para un tramo acotado del río Baker estudiado, comprendido entre los kilómetros 15.5 a 18.5.

Anexo C. HEC-RAS y Visual Basic Express 2010

En esta parte se detallan las indexaciones de las diferentes variables proporcionadas por HEC-RAS v 4.1.0, controlado mediante Visual Basic Express 2010.

La función mediante la cual se leen los resultados proporcionados por HEC-RAS a través de Visual Basic Express 2010 es la siguiente:

```
hecras.Output_ReachOutput(riv,rch,prof,nVar,nRS,RS,ChannelDist,Value)[11]
```

Donde:

riv := Como Integer asociado a cada río de un proyecto en particular. Este es asignado por HEC-RAS a cada río del proyecto.

rch := Como Integer asociado a cada tramo de cada río de un proyecto en particular. Este es asignado por HEC-RAS a cada tramo del proyecto.

prof := Como Integer asociado al perfil de flujo definido previamente en HEC-RAS.

nVar := Como Integer relacionado con qué variable deseo obtener para un río y tramo en particular. Su valor varía entre 1 y 266 dependiendo de la variable buscada.

nRS := Como Integer número de estaciones de ríos o número de perfiles transversales.

RS := Arreglo proporcionado por la función con todas las secciones transversales del río y tramo predefinidas anteriormente.

ChannelDist := Arreglo proporcionado por la función con las distancias entre secciones transversales.

Value := Arreglo de valores de la variable definida previamente en nVar, proporcionado por la función, asociado a todas las secciones transversales del río y tramo

[11] Para ver la aplicación de esta función, véase Anexo (B.2) el que contiene el código fuente de MR-HR.

predefinidas anteriormente en conjunto con el perfil de flujo para el cual se desea ejecutar HEC-RAS.

En la siguiente tabla se indica en detalle toda la indexación de nVar en conjunto con su descripción.

Tabla C-1: Indexación, Significado y Descripción de Variable nVar.

nVar	Significado	Descripción
1	Profile	Profile number.
2	W.S. Elev	Calculated water surface from energy equation.
3	E.G. Elev	Energy gradeline for given WSEL.
4	Max Chl Dpth	Maximum main channel depth.
5	Min Ch El	Minimum channel elevation.
6	Q Left	Flow in left overbank.
7	Q Channel	Flow in main channel.
8	Q Right	Flow in right overbank.
9	Q Total	Total flow in cross section.
10	Flow Area	Total area of cross section active flow.
11	Flow Area L	Area of left overbank active flow.
12	Flow Area Ch	Area of main channel active flow.
13	Flow Area R	Area of right overbank active flow.
14	W.P. Total	Wetted perimeter of total cross section.
15	W.P. Left	Wetted perimeter of left overbank.
16	W.P. Channel	Wetted perimeter of main channel.
17	W.P. Right	Wetted perimeter of right overbank.
18	Conv. Total	Conveyance of total cross section.
19	Conv. Left	Conveyance of left overbank.
20	Conv. Chnl	Conveyance of main channel.
21	Conv. Right	Conveyance of right overbank.
22	Vel Head	Velocity head.
23	Vel Total	Average velocity of flow in total cross section.
24	Vel Left	Average velocity of flow in left overbank.
25	Vel Chnl	Average velocity of flow in main channel.
26	Vel Right	Average velocity of flow in right overbank.
27	Alpha	Alpha - energy weighting coefficient.
28	Beta	Beta - momentum weighting coefficient.
29	Top Wdth Act	Top width of the wetted cross section, not including ineffective flow.
30	E.G. Slope	Slope of the energy grade line at a cross section.
31	Volume	Cumulative volume of water from the downstream end of the reach (including ineffective areas).
32	Area	Flow area of the entire cross section including ineffective flow.
33	Area Left	Flow area of the left overbank including ineffective flow.
34	Area Channel	Flow area of the main channel including ineffective flow.
35	Area Right	Flow area of the right overbank including ineffective flow.
36	Sta W.S. Lft	Left station where water intersects the ground.
37	Sta W.S. Rgt	Right station where water intersects the ground.
38	Left Sta Eff	Furthest left station where there is effective flow.

Tabla C-1: Indexación, Significado y Descripción de Variable nVar. (continuación 1)

39	Rght Sta Eff	Furthest right station that still has effective flow.
40	Length Wtd.	Weighted length based on flow distribution, in left bank, channel, and right bank.
41	Length Left	Downstream reach length of the left overbank.
42	Length Chnl	Downstream reach length of the main channel to next XS (unless BR is d/s, then this is the distance to the deck/roadway).
43	Length Rght	Downstream reach length of the right overbank.
44	Mann Wtd Left	Conveyance weighted Manning's n for the left overbank.
45	Mann Wtd Chnl	Conveyance weighted Manning's n for the main channel.
46	Mann Wtd Rght	Conveyance weighted Manning's n for the right overbank.
47	Mann Comp	Mannings n value for main channel based on composite roughness equation.
48	Froude # Chl	Froude number for the main channel.
49	Froude # XS	Froude number for the entire cross section.
50	Trvl Tme Avg	Cumulative travel time based on the average velocity of the entire cross section per reach.
51	Trvl Tme Chl	Cumulative travel time based on the average velocity of the main channel per reach.
52	Conv. Ratio	Ratio of the conveyance of the current cross section to the conveyance of the downstream cross section.
53	Specif Force	The specific force for this cross section at the computed water surface elevation.
54	Spc Force PR	Specific force prime. For mixed flow, the specific force at this cross section for the flow regime that does not control.
55	W.S. Prime	Water surface prime. For mixed flow, the water surface of the flow regime that does not control.
56	Crit W.S.	Critical water surface elevation. Water surface corresponding to the minimum energy on the energy versus depth curve.
57	Crit E.G.	Critical energy elevation. Minumum energy on the energy versus depth curve.
58	Crit Depth	Critical depth. Corresponds to critical water surface.
59	Frctn Loss	Friction loss between two cross sections.
60	C & E Loss	Contraction or expansion loss between two cross sections.
61	Headloss	Total energy loss between two cross sections.
62	Top Width	Top width of the wetted cross section.
63	Top W Left	Top width of the left overbank. Does not include `islands', but it does include ineffective flow.
64	Top W Chnl	Top width of the main channel. Does not include `islands', but it does include ineffective flow.
65	Top W Right	Top width of the right overbank. Does not include `islands', but it does include ineffective flow.
66	Num Trials	Current number (or final number) of trials attempted before the energy equation is balanced.
67	Std Stp Case	Standard step method used to determine WSEL (1 = successful convergence, 2 = minimum error, 3 = resorted to critical depth).
68	Frctn Slope	Representative friction slope between two cross sections.
69	Frctn Slp Md	Friction slope averaging method used.
70	Min Error	The minimum error, between the calculated and assumed water surfaces when balancing the energy equation.
71	Delta WS	Change in water surface through culvert(s) and Bridge(s).
72	Delta EG	Change in energy grade line through culvert(s) and Bridge(s).
73	Q Culv Group	Flow through all barrels in a culvert.
74	Q Barrel	Flow through one barrel in a culvert.
75	W.S. US.	Upstream water surface elevation upstream of bridge, culvert or weir (specific to that opening, not necessarily the energy weighted average).
76	Clv EG No Wr	Energy grade elevation at the culvert that was calculated without the weir.
77	E.G. US.	Upstream energy grade elevation at bridge or culvert (specific to that opening, not necessarily the weighted average).
78	E.G. IC	Upstream energy gradeline based on inlet control.
79	E.G. OC	Upstream energy gradeline based on outlet control.
80	Culv Nml Depth	Normal depth for this culvert (and flow).
81	Culv Vel DS	Velocity in culvert at defined downstream.
82	Culv Vel US	Velocity in culvert at defined upstream.
83	Culv Frctn Ls	Friction loss through the culvert.
84	Culv Entr Loss	Entrance loss (energy loss due only to entrance).

Tabla C-1: Indexación, Significado y Descripción de Variable nVar. (continuación 2)

85	Culv Exit Loss	Exit loss (energy loss due to exit).
86	Culv Full Len	The length that the culvert flows full.
87	Culv Crt Depth	Critical depth inside the culvert.
88	Culv Inv El Up	Culvert invert elevation upstream.
89	Culv Inv El Dn	Culvert invert elevation downstream.
90	Culv EG Inlet	Energy gradeline inside the culvert at the inlet.
91	Culv EG Outlet	Energy gradeline inside the culvert at the outlet.
92	Culv WS Inlet	Water surface elevation inside the culvert at the inlet.
93	Culv WS Outlet	Water surface elevation inside the culvert at the outlet.
94	Q Weir	Flow over the weir.
95	Weir Flow Area	Area of the flow going over the weir.
96	Weir Sta Lft	Station where flow starts on the left side.
97	Weir Sta Rgt	Station where flow ends on the right side.
98	Weir Max Depth	The maximum depth over the weir.
99	Weir Avg Depth	The average depth over the weir.
100	Weir Submerg	The ratio of the downstream depth above the weir to the upstream depth above the weir.
101	Min El Weir Flow	Elevation where weir flow begins.
102	Wr Top Wdth	Top width of water over the weir.
103	Energy/Wr WS	Water surface elevation upstream of bridge for low flow energy method and weir flow.
104	Yarnell WS	Water surface elevation upstream of bridge for Yarnell method.
105	WSPRO WS	Water surface elevation upstream of bridge for the WSPRO method.
106	Prs/Wr WS	Water surface elevation upstream of bridge for pressure and/or weir method.
107	Energy WS	Water surface elevation upstream of bridge for energy only method.
108	Momen. WS	Water surface elevation upstream of bridge for momentum method.
109	Prs O WS	Water surface elevation upstream of bridge for pressure only method.
110	Energy/Wr EG	Energy grade elevation upstream of bridge for energy method .
111	Yarnell EG	Energy grade elevation upstream of bridge for Yarnell method.
112	WSPRO EG	Energy grade elevation upstream of bridge for the WSPRO method.
113	Prs/Wr EG	Energy grade elevation upstream of bridge for pressure and/or weir method.
114	Energy EG	Energy grade elevation upstream of bridge for energy only method.
115	Momen. EG	Energy grade elevation upstream of bridge for momentum method.
116	Prs O EG	Energy grade elevation upstream of bridge for pressure only method.
117	Br Sel Method	Selected bridge method.
118	Min El Prs	Elevation at the bridge when pressure flow begins.
119	Crit Num	Number of critical depths found.
120	Crit W.S. 1	Water surface elevation of first critical depth.
121	Crit W.S. 2	Water surface elevation of second critical depth.
122	Crit W.S. 3	Water surface elevation of third critical depth.
123	Crit Enrgy 1	Energy associated with first critical depth.
124	Crit Enrgy 2	Energy associated with second critical depth.
125	Crit Enrgy 3	Energy associated with third critical depth.
126	Hydr Depth	Hydraulic depth for cross section.
127	Hydr Depth L	Hydraulic depth in left over bank.
128	Hydr Depth C	Hydraulic depth in channel.
129	Hydr Depth R	Hydraulic depth for right over bank.
130	Deck Width	Width of Deck.
131	# Barrels	Number of barrels in a culvert.

Tabla C-1: Indexación, Significado y Descripción de Variable nVar. (continuación 3)

132	Q Bridge	Flow through a bridge opening.
133	Vol Left	Cumulative volume of water in the left overbank from the downstream end of the reach (including ineffective areas).
134	Vol Chan	Cumulative volume of water in the channel from the downstream end of the reach (including ineffective areas).
135	Vol Right	Cumulative volume of water in the right overbank from the downstream end of the reach (including ineffective areas).
136	Min El	Minimum overall section elevation.
137	Enc Val 1	Target for encroachment analysis.
138	Enc Val 2	Second target for encroachment analysis.
139	Enc Sta L	Left station of encroachment.
140	Enc Sta R	Right station of encroachment.
141	Dist Center L	Distance from center of channel to left encroachment.
142	Dist Center R	Distance from center of channel to right encroachment.
143	K Perc L	Conveyance reduction from left encroachment.
144	K Perc R	Conveyance reduction from right encroachment.
145	Q Perc L	Percent of flow in left overbank.
146	Q Perc Chan	Percent of flow in main channel.
147	Q Perc R	Percent of flow in right overbank.
148	Prof Delta WS	Difference in WS between current profile and WS for first profile.
149	Prof Delta EG	Difference in EG between current profile and EG for first profile.
150	Shear Total	Shear stress in total section.
151	Shear LOB	Shear stress in left overbank.
152	Shear Chan	Shear stress in main channel.
153	Shear ROB	Shear stress in right overbank.
154	Power Total	Total stream power.
155	Power LOB	Total stream power in left overbank.
156	Power Chan	Total stream power in main channel.
157	Power ROB	Total stream power in right overbank.
158	Ch Sta L	Left station of channel.
159	Ch Sta R	Right station of channel.
160	Base WS	Water surface for first profile (used in comparison of encroachments).
161	Center Station	Center station of main channel.
162	XS Delta WS	Change in water surface between current section and next one downstream.
163	XS Delta EG	Change in energy gradeline between current section and next one downstream.
164	SA Total	Cumulative surface area for entire cross section (including ineffective areas) from the downstream end of the reach.
165	SA Left	Cumulative surface area for left overbank (including ineffective areas) from the downstream end of the reach.
166	SA Chan	Cumulative surface area for main channel (including ineffective areas) from the downstream end of the reach.
167	SA Right	Cumulative surface area for right overbank (including ineffective areas) from the downstream end of the reach.
168	Enc Method	Encroachment method.
169	Q Gate Group	Flow through all gate openings in a gate group.
170	Gate Open Ht	Height of gate opening.
171	Gate #Open	The number of gates opened in the current group.
172	Gate Area	The flow area in an opened gate.
173	Gate Submerg	The ratio of the downstream depth above the gate to the upstream depth above the gate.
174	Gate Invert	Gate spillway invert elevation.
175	Q Gates	Total flow through all of the gate groups of an inline/lateral structure.
176	BR Open Area	Total area of the entire bridge opening.
177	Coef of Q	WSPRO bridge method coefficient of discharge.

Tabla C-1: Indexación, Significado y Descripción de Variable nVar. (continuación 4)

178	Cum Ch Len	Cumulative Channel Length from the downstream end of the reach.
179	Enc WD	Encroachment Width.
180	Obs WS	Observed Water Surface.
181	WS Air Entr.	Water surface elevation accounting for air entrainment.
182	BR Open Vel	Average velocity inside the bridge opening (Maximum of BU and BD).
183	Ice Thick LOB	Ice thickness in the left overbank.
184	Ice Thick Chan	Ice thickness in the main channel.
185	Ice Thick ROB	Ice thickness in the right overbank.
186	Ice Vol Total	Cummulative volume of ice in an ice jam.
187	Ice Vol. LOB	Cummulative volume of ice in the left overbank for an ice jam.
188	Ice Vol. Chan	Cummulative volume of ice in the main channel for an ice jam.
189	Ice Vol. ROB	Cummulative volume of ice in the right overbank for an ice jam.
190	Ice Top LOB	The top elevation of ice in the left overbank.
191	Ice Top Chan	The top elevation of ice in the main channel.
192	Ice Top ROB	The top elevation of ice in the right overbank.
193	Ice Btm LOB	The bottom elevation of ice in the left overbank.
194	Ice Btm Chan	The bottom elevation of ice in the main channel.
195	Ice Btm ROB	The bottom elevation of ice in the right overbank.
196	Invert Slope	The slope from the invert of this cross section to the next cross section downstream.
197	LOB Elev	The ground elevation at the left bank of the main channel.
198	ROB Elev	The ground elevation at the right bank of the main channel.
199	L. Freeboard	The freeboard in the main channel at the left bank.
200	R. Freeboard	The freeboard in the main channel at the right bank.
201	Levee El Left	The elevation of the left levee.
202	Levee El Right	The elevation of the right levee.
203	Ineff El Left	The elevation of the left ineffective area.
204	Ineff El Right	The elevation of the right ineffective area.
205	L. Levee Frbrd	The freeboard before the left levee is over-topped.
206	R. Levee Frbrd	The freeboard before the right levee is over-topped.
207	Mann Wtd Total	Mannings n value for the total main cross section.
208	Hydr Radius	Hydraulic radius for cross section.
209	Hydr Radius L	Hydraulic radius in left over bank.
210	Hydr Radius C	Hydraulic radius in channel.
211	Hydr Radius R	Hydraulic radius for right over bank.
212	Hydr Rad 2/3	Hydraulic radius for cross section to the 2/3 power.
213	W.S. DS	Water surface downstream.
214	E.G. DS	Energy elevation downstream.
215	Min Weir El	Minimum weir elevation.
216	Perc Q Leaving	Percentage of flow leaving through a lateral structure.
217	Q US	Flow in cross section upstream of a lateral structure.
218	Q DS	Flow in cross section downstream of lateral structure.
219	Weir Sta US	Upstream station for weir flow starts.
220	Weir Sta DS	Downstream station where weir flow ends.
221	Q Leaving Total	Total flow leaving in a lateral structure including all gates, culverts and lateral rating curves.
222	SA Min El	Minimum elevation of a storage area.
223	SA Area	Surface area of a storage area.
224	SA Volume	Storage volume of a storage area.

Tabla C-1: Indexación, Significado y Descripción de Variable nVar. (continuación 5)

225	Top W Act Left	Top width of the wetted left bank, not including ineffective flow.
226	Top W Act Chan	Top width of the wetted channel, not including ineffective flow.
227	Top W Act Right	Top width of the wetted right bank, not including ineffective flow.
228	Culv Depth Blocked	Depth of fill in a culvert.
229	Culv Inlet Mann n	The composite n value at the culvert inlet.
230	Culv Outlet Mann n	The composite n value at the culvert outlet.
231	Ice WS Err	Convergence error in water surface for dynamic ice jam.
232	Ice Err	Convergence error in ice thickness for dynamic ice jam.
233	Piping Flow	Flow from piping weir failure.
234	Breach CL	Center line of weir breach.
235	Breach WD	Bottom width of weir breach.
236	Breach Bottom El	Bottom Elevation of weir breach.
237	Breach Top El	Top Elevation of weir breach.
238	Breach SSL	Left side slope of weir breach.
239	Breach SSR	Right side slope of weir breach.
240	Q Pump Group	Pump group flow.
241	Q Lat RC	Lateral rating curve flow.
242	Q Culv	Total flow in all culvert groups.
243	Culv Length	Length of the culvert barrel.
244	Q Pump Station	Total flow in all pump groups in a pump station.
245	WS Inlet	WS at the inlet of a pump station.
246	WS Outlet	WS at the outlet of a pump station.
247	Pumping Head	Pumping head for the pump station.
248	Inflow	Net inflow into a storage area.
249	Outflow	Net outflow into a storage area.
250	Net Flux	Net inflow - outflow for a storage area.
251	Enc Offset L	Minimum setback from the left overbank station.
252	Enc Offset R	Minimum setback from the right overbank station.
253	Min Ch Pilot	Minimum channel elevation (including pilot channels).
254	Diff	Difference between the previous two columns.
255	Min Ch El Sta	Station of the minimum channel elevation.
256	Culv Area DS	Cross sectional flow area in culvert at defined downstream.
257	Culv Area US	Cross sectional flow area in culvert at defined upstream.
258	Gate Weir Coef	Coefficient used in weir flow over the gate.
259	Weir Coef	Coefficient used in weir flow.
260	Q Breach	Flow through a breach.
261	Breach Avg Velocity	Average flow velocity through a breach.
262	Breach Flow Area	Flow area through a breach.
263	Left Station	Left station of the cross section.
264	Right Station	Right station of the cross section.
265	Levee Sta Left	Left levee station.
266	Levee Sta Right	Right levee station.

Fuente: Elaboración Propia en Base a HEC-RAS v 4.1.0