



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



Estimación de la Socavación General: Análisis comparativo

TESIS

para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería Hidráulica

Presenta:

Ing. Tilo Jesus Huerta Amaya

Director:

Dr. José Guadalupe Fabián Rivera Trejo

Cunduacán, Tabasco, México.

Diciembre de 2018



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura**



DIRECCIÓN

OFICIO: DIR/DAIA/1331/2018
FECHA: 29 de Junio 2018
ASUNTO: Autorización de Impresión Definitiva

C. ING. TILO JESÚS HUERTA AMAYA
PASANTE DE LA MAESTRIA EN INGENIERÍA HIDRÁULICA
PRESENTE.

En virtud de haber elaborado su trabajo de Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Hidráulica, el cual ha sido dirigido por el Dr. José Guadalupe Fabián Rivera Trejo denominado:

"ESTIMACIÓN DE LA SOCAVACIÓN GENERAL: ANÁLISIS COMPARATIVO"

Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen de obtención de grado.

Sin otro particular, le envío un afectuoso saludo.

ATENTAMENTE

DR. GERMÁN PÉREZ HERNÁNDEZ
DIRECTOR

**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**
DIVISIÓN ACADÉMICA DE
INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



C.c.p. Archivo

DR*GPH/Dra.MAAL/apl***



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



**División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura**

COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Cunduacán, Tabasco, a 22 de Junio de 2018

MEM/MCI/008/2018

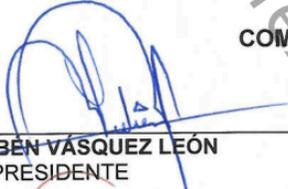
PARA: DR. GERMÁN PÉREZ HERNÁNDEZ
DIRECTOR DE LA DAIA
DE: COMISIÓN SINODAL
ASUNTO: APROBACIÓN DE IMPRESIÓN TESIS DE MAESTRIA

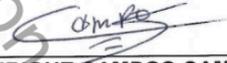
Una vez hecha la revisión detallada del Trabajo de Tesis denominado:

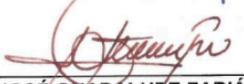
"ESTIMACIÓN DE LA SOCAVACIÓN GENERAL: ANÁLISIS COMPARATIVO"

Desarrollado por el C. **ING. TILO JESÚS HUERTA AMAYA** de la **Maestría en Ingeniería Hidráulica**, le comunicamos que aceptamos la impresión del trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

COMISIÓN SINODAL


DR. RUBÉN VÁSQUEZ LEÓN
PRESIDENTE


M.I.H. ENRIQUE CAMPOS CAMPOS
SECRETARIO


**DR. JOSÉ GUADALUPE FABIÁN RIVERA
TREJO**
VOCAL 1


DRA. LAURA LORENA DÍAZ FLORES
VOCAL 2


DR. JUAN BARAJAS FERNÁNDEZ
VOCAL 3

c.c.p. Archivo



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



Asunto: **Carta de autorización**

Por este medio, tengo a bien conceder mi autorización para que la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco utilice tanto física como digitalmente la tesis de Grado de Maestría en Ingeniería Hidráulica titulada "Estimación de la Socavación General: Análisis comparativo" del cual soy autor y titular de los derechos de autor.

La Universidad Juárez Autónoma de Tabasco podrá hacer uso de la tesis mencionada para propósitos educativos, de difusión sin fines de lucro; asimismo se autoriza para subirla a la Red abierta de Bibliotecas Digitales (RABID), o cualquier otra red académica que por conveniencia sea considerada por la Universidad.

Por lo anterior, la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco queda liberada de cualquier reclamación legal que se pudiera llegar a ejercer, relativa al uso y manipulación de dicha tesis para los fines ya estipulados en el presente.

Se firma la presente a los 10 días del mes de diciembre del 2018, en la ciudad de Cunduacán, Tabasco.

Atentamente.

Ing. Tilo Jesus Huerta Amaya

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), por haberme permitido formar parte de esta institución, así como todos y cada uno de los apoyos que me brindo en el tiempo que realice mis estudios.

Agradezco profundamente al Dr. Fabián Rivera Trejo, director de esta tesis, por haberme aceptado como su pupilo, así como el apoyo incondicional y la confianza que me brindo durante la realización de esta tesis.

A todos y cada uno de mis profesores de la maestría en hidráulica, ya que de ellos adquirí el conocimiento y las herramientas necesarias para continuar en el camino del conocimiento.

A la empresa Grupo de Ingeniería y Construcción Zeta, por toda la información de campo y gabinete proporcionada en el desarrollo de esta tesis.

Agradezco infinitamente al Arquitecto Pedro Zamora Acosta, por su amistad, confianza y apoyo incondicional a lo largo de todos estos años.

Agradezco infinitamente al Ing. Javier de la O León, por el apoyo incondicional que me ha brindado en el transcurso de mi carrera tanto profesional como laboral.

A mi esposa Maricela Gonzalez Torres, por creer en mí, por apoyarme y estar conmigo en los momentos más difícil de mi vida y también por ser parte de mi presente.

A todos y cada uno de los amigos que creyeron en mí, ya que con sus palabras de aliento lograron darme ánimo para llegar a la meta de esta etapa profesional.

¹⁴ A toda mi familia que siempre ha estado a mi lado, demostrándome su interés y apoyo incondicional.

¡Gracias!



DEDICATORIA

A Dios nuestro señor, ya que él ha hecho posible todas y cada uno de los logros y metas que he alcanzado.

A mi madre, por toda la paciencia y apoyo incondicional a lo largo de mi vida.

A mi esposa Maricela, por compartir una más de mis metas.

A mis hijos Ramsés, Abigail y Esdras, motivación y fuerza para salir a delante ante cualquier adversidad.

A mis hermanos, ya que con esto queda demostrado que si uno se lo propone pueden lograr cualquier objetivo.

A mi amigo el Arq. Pedro Zamora Acosta, por su apoyo incondicional y confianza.

A mi amigo el Ing. Javier de la O León, por formar parte de mis logros y metas.



INDICE

LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABLAS	6
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO	12
1.1 Socavación	12
1.1.1 Factores que influyen en la socavación	12
1.1.2 Tipos de socavación	13
1.2 Análisis de la socavación	18
1.2.1 Teoría del régimen	19
CAPÍTULO II. MÉTODOS PARA ESTIMAR LA SOCAVACIÓN GENERAL	22
2.1 Método de Lischtvan-Lebediev (1959)	22
2.1.1 Socavación general para suelo friccionante (arenas y gravas)	23
2.1.2 Socavación general para suelo no friccionante (arcilla y limos)	25
2.2 Método de Maza (1968)	27
2.3 Método de socavación de C.R. Neill (1973)	30
2.4 Método de socavación de Laursen (1963)	33
2.5 Método generalizado (2003)	36
2.5.1 Velocidad crítica y de equilibrio	36
2.5.2 Resistencia al flujo	37
2.5.3 Profundidad de socavación	38
CAPÍTULO III. CASO DE APLICACIÓN	41
3.1 Zona de Estudio	41
3.2 Recopilación de datos de entrada	43
3.3 Metodología de cálculo	50
3.3.1 Método de Lischtvan – Lebediev (L – L)	51
3.3.2 Método de Maza Álvarez (M)	51
3.3.3 Método de C.R Neill (N)	52
3.3.4 Método de Laursen (L)	54
3.3.5 Método Generalizado	55
CAPÍTULO IV. RESULTADOS	57



4.1 Método Lischtvan - Lebediev 57
4.2 Método Maza Álvarez 58
4.3 Método de C.R. Neill 59
4.4 Método de Laursen 60
4.5 Método Generalizado 62
CAPÍTULO V. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES 68
CAPÍTULO VI. REFERENCIAS 71

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.



LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de socavación	12
Figura 2 Socavación general	14
Figura 3 Socavación transversal	14
Figura 4 Socavación en curvas	15
Figura 5 Socavación local al pie de obras rodeadas por las corrientes	15
Figura 6 Socavación local al pie de obras unidas por la margen	16
Figura 7 Socavación aguas abajo de las presas	16
Figura 8 Socavación local aguas abajo de descargas de tanques o deflectores	17
Figura 9 Socavación de aguas arriba de cortes de meandros y rectificaciones.....	17
Figura 10 Socavación local bajo tuberías.....	18
Figura 11 Analogía de la balanza de Lane (Barbosa, 2013)	19
Figura 12 Sección transversal del cauce	27
Figura 13 Sección transversal del cauce	30
Figura 14 Sección transversal del cauce	31
Figura 15 Sección transversal del cauce	33
Figura 16 Sección transversal del cauce	40
Figura 17 Ubicación de zona de estudio (Google Earth).....	41
Figura 18 Ubicación a detalle de cruce direccional (SIATL, INEGI).....	42
Figura 19 Margen Izquierda del río Mezcalapa (Zona de cruzamiento).....	43
Figura 20 Sección Transversal Tipo. Cadenamiento 3+686.77.....	44
Figura 21 Análisis Granulométrico del material (SM-1) Cadenamiento 3+686.77.....	45
Figura 22 Análisis Granulométrico del material (SM-2) Cadenamiento 3+686.77.....	45
Figura 23 Análisis Granulométrico del material (SM-3) Cadenamiento 3+686.77.....	46
Figura 24 Análisis Granulométrico del material (SM-4) Cadenamiento 3+686.77	46
Figura 25 Análisis Granulométrico del material (SM-5) Cadenamiento 3+686.77.....	47
Figura 26 Sección transversal del cauce	50
Figura 27 Comparativa de Socavación general.....	64
Figura 28 Comparativa de Alturas de socavación (L-L, MG, L, M, N).....	66



LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Formulaciones para estimar la velocidad critica. (Barbosa, 2013).....	34
Tabla 2 Coeficientes para la velocidad competente (Barbosa, 2013).....	35
Tabla 3 Formulas para velocidad critica (Fariás <i>et al.</i> , 2003)	37
Tabla 4 Constante para la resistencia al flujo (Fariás <i>et al.</i> , 2003).....	38
Tabla 5 Diametros Caracteristicos	47
Tabla 6 Pendiente Hidráulica en Río Mezcalapa.....	48
Tabla 7 Datos de entrada.....	49
Tabla 8 Identificación de los métodos.....	50
Tabla 9 Cálculo de socavación general (L-L).....	51
Tabla 10 Cálculo de socavación general (M)	52
Tabla 11 Cálculo de socavación general (N)	53
Tabla 12 Cálculo de socavación general (L).....	55
Tabla 13 Cálculo de socavación general (MG)	56
Tabla 14 Resultado de Socavación General (L – L) Cadenamiento 3+686.77.....	57
Tabla 15 Resultado de Socavación General (M) Cadenamiento 3+686.77.....	58
Tabla 16 Resultado de Socavación General (N) Cadenamiento 3+686.77	59
Tabla 17 Resultado de Socavación General (L) Cadenamiento 3+686.77.....	60
Tabla 18 Resultado de Socavación General (MG) Cadenamiento 3+686.77.....	62
Tabla 19 Alturas de profundidades de socavación y deposito (máximos y mínimos). 63	



RESUMEN

La socavación general se produce en un cauce cuando se combinan una serie de elementos naturales, físicos y de intervención humana. La socavación general es un fenómeno importante que se debe considerar para el diseño de obras hidráulicas. Para calcular la socavación general, existen métodos empíricos y software instrumentados que nos ayudan a predecir este fenómeno.

El presente trabajo tiene como objetivo principal comparar cinco métodos empíricos de socavación general que utilizan para su análisis la teoría del régimen. Estos métodos de cálculo fueron aplicados a un caso real de ingeniería (Cruzamiento direccional de un Gasoducto de 16"Ø sobre el río Mezcalapa). Para su análisis, se agruparon los datos de entrada en tres grupos: Geométricos (ancho y forma de la sección del cauce), Hidráulicos (gasto, pendiente, velocidad y tirante) y Geotécnicos (granulometría y diámetro característico del material del cauce).

Se elaboraron plantillas de cálculo en Excel para reproducir los cinco métodos seleccionados. Los resultados obtenidos de las plantillas de cálculo, se graficaron y se compararon entre sí, para tener una visualización del comportamiento del fondo del cauce.

Se encontró que el método tradicional de Lischtvan-Lebediev y el método de Maza Álvarez, presentan resultados de socavación similares. El método Generalizado (que es el más reciente), presentó la menor socavación. El método de Laursen fue el que presentó las mayores profundidades de socavación. Por último, el método de Neill, no presentó socavación, sin embargo, este método se distingue de los anteriores por presentar depósito de material en el fondo. Por lo tanto, a partir de los resultados obtenidos en este trabajo, se presenta una guía metodológica para estimar la socavación general en un río con fondo arenoso.

Palabras clave: Socavación general, Velocidad crítica, Granulometría.



ABSTRACT

The general scour occurs in a channel when a series of natural, physical and human intervention elements are combined. General scour is an important phenomenon that must be considered for the design of hydraulic works. To calculate the general scour, there are empirical methods and instrumented software that help us predict this phenomenon.

The main objective of this paper is to compare five empirical methods of general scouring that use regime theory for their analysis. These calculation methods were applied to a real engineering case (Directional crossing of a pipeline of 16"ø on the Mezcalapa river). For its analysis, the input data were grouped into three groups: Geometric (width and shape of the channel section), Hydraulic (expense, slope, speed and tie) and Geotechnical (granulometry and characteristic diameter of the channel material).

Excel calculation templates were used to reproduce the five selected methods. The results obtained from the calculation templates were plotted and compared with each other, to have a visualization of the behavior of the bottom of the channel.

We find that the Lischtvan-Lebediev and the Maza Álvarez methods had been similar scour results. The Generalized method (which is the most recent), was presented the minor scour. Otherwise, the Laursen method had been presented the greatest scour. Finally, Neill's method did not present scour, however, this method is distinguished from the others ones due at presenting deposit of material in the background. Therefore, from the results obtained from this work. We have presented and discussed a methodological guide to estimate the general scour in a river with a sandy bottom.

Keywords: General Scour, Critical Sped, Granulometry.



INTRODUCCIÓN

La socavación es un proceso físico complejo, que afecta a estructuras construidas sobre el cauce, principalmente a puentes (Richardson y Lagasse, 1999; Nalluri *et al.*, 1999; Díaz, 2012). Ocasiona que estos colapsen, lo que provoca problemas sociales, pérdidas económicas y algunas veces pérdidas de vidas humanas (Suarez, 2008; Aguado, 2012).

En los últimos años y con la finalidad de calcular la socavación, se han empleado: a) mediciones de campo (Barbosa, 2013; Han-Chung y Chih-Chiang, 2014; Prendergast y Gavin, 2014); b) modelos físicos (Zetina *et al.*, 2012; IMT, 2012, García, 2014); y, c) simulación numérica (Corral *et al.*, 2003; Pérez, 2012; Rincón *et al.*, 2015). Siendo esta última muy popular debido a la rapidez y economía. Entre los software más populares para estimar la socavación se cuenta con lo siguiente: BRI-STAR (Molinas, 1993), HEC-6 (U.S. Army Corps of Engineers, 1993; Fariás *et al.*, 2008; Barbosa, 2013), CAESAR (Palmer *et al.*, 1999).

En México, la principal referencia en la que se basan la mayoría de los cálculos de socavación es el Manual de Ingeniería de Ríos, elaborado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. (García y Maza, 1996); así como, el manual de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (S.C.T., 2014). Se utiliza tradicionalmente el método de Lischtván-Lebediev para calcular la socavación general (Tlatempa *et al.*, 2014; Montejo *et al.*, 2014; S.C.T., 2014), ya que para su aplicación los datos que requiere son fáciles de obtener (Santiago, 2007).



Los métodos elegidos para comparar la socavación general fueron:

- I) Lischtván – Levediev (Maza y García, 1996)
- II) Maza Álvarez (Aldana y Ordoñez, 2003)
- III) Laurßen (Barbosa, 2013)
- IV) Neill (Jaramillo, 2013)
- V) Método generalizado (Farias, 2003)

La estructuración de este trabajo consiste en cinco capítulos de gran interés:

Capítulo I, se definieron los conceptos básicos de socavación general, además de una breve explicación sobre la teoría con la cual se rigen la mayoría de los métodos empíricos.

Capítulo II, se presentan de acuerdo a las literaturas las metodologías de cálculo de los cinco métodos elegidos para estimar la socavación general.

Capítulo III, se recopiló la información de campo y gabinete (Topografía, batimetría del cauce, Estudio hidrológico de la zona, Modelación hidráulica y cálculos hidráulicos) con el fin de calibrar los datos de entrada de los métodos de socavación seleccionados.

Capítulo IV, se aplicaron las formulaciones empíricas de los cinco métodos de socavación presentadas en el capítulo segundo. Los resultados e interpretaciones se presentan en formatos de tablas y gráficas elaboradas en Excel.

Capítulo V, se presentan las conclusiones y recomendaciones de los resultados obtenidos en el capítulo IV.



OBJETIVOS (General y específicos)

- **Objetivo General:** Comparar cinco métodos para estimar la socavación general.
- **Objetivos Específicos:**
 - Familiarización y aplicación del Método de Lischtvan – Levediev.
 - Familiarización y aplicación del Método de Maza Álvarez.
 - Familiarización y aplicación del Método de Laursen.
 - Familiarización y aplicación del Método de Neill.
 - Familiarización y aplicación del Método generalizado.
 - Comparar e interpretar los resultados obtenidos de la estimación de la profundidad socavada aplicando las formulaciones antes mencionadas.



CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 Socavación

La erosión es un fenómeno que se presenta a largo y corto plazo en el fondo, orillas y márgenes de los ríos. Se manifiesta por el descenso de la cota o nivel del cauce y es originado por la capacidad que tiene la corriente de agua de arrastrar partículas, especialmente durante las crecidas y avenidas. (Maza y Sánchez, 1964; Maza y García, 1996; Vide, 2003; Farías *et al.*, 2003; Suárez, 2008; Jaramillo, 2013; Barbosa, 2013). Comúnmente el proceso de erosión se presenta en las curvas de los ríos, sobre todo en los de planicie, que tienden a erosionarse en la parte cóncava o exterior de la curva, y a generar depósito en la parte convexa o interior de la misma.

Al presentarse la erosión hídrica, surge el fenómeno llamado socavación. Este se genera por la acción erosiva del flujo de agua alrededor de una estructura hidráulica, provocando con ello una profundización (excavación) del nivel del fondo del cauce (Figura 1). Al igual que la erosión, la socavación se genera a partir del aumento de los niveles de agua, de las modificaciones en la morfología y por la inclusión de obras civiles en los ríos (Forde *et al.*, 1999).

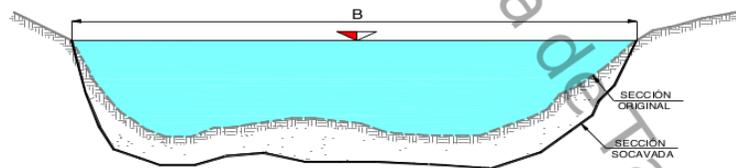


Figura 1 Esquema de socavación

1.1.1 Factores que influyen en la socavación

Existen factores que inciden en el fenómeno de socavación en un cauce. Dentro de ellos se encuentran los factores geomorfológicos y de transporte.



Los factores geomorfológicos, se refieren a las características de la cuenca y el río analizados. Por ejemplo: factores climáticos, usos y tipo de suelos.

Los factores de transporte se refieren a los transportes tanto de agua, como de sedimentos, las características del flujo, la velocidad, duración, gasto y frecuencia; además, de las tasas de transporte y tipo de material transportado.

Otros factores que influyen en la socavación son: la pendiente media del cauce, la geometría de la sección transversal, la estratigrafía del tipo de material, las condiciones de bordo lleno del canal y las avenidas.

1.1.2 Tipos de socavación

Las principales socavaciones que ocurren en los cauces, tanto de forma natural como originada por la presencia de obras hidráulica son:

Erosión general. Consiste en el descenso generalizado del fondo del río como consecuencia de una mayor capacidad de la corriente para arrastrar y transportar en suspensión al material del fondo durante el paso de una avenida. La erosión ocurrirá siempre que el volumen del sedimento transportado en la sección de aguas abajo, en un tiempo dado, sea mayor que el que entra por la sección de aguas arriba en el mismo periodo. La erosión general puede ocurrir a todo lo largo del río (Figura 2).



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

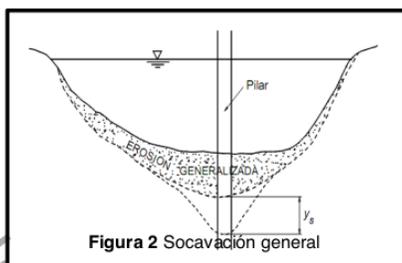


Figura 2 Socavación general

Erosión transversal. Se produce en todas aquellas secciones en donde se reduce el ancho del río, ya sea por factores humanos o naturales. La acción erosiva disminuye a medida que se incrementa la profundidad, y se detiene cuando se cumple el principio de continuidad del líquido y del sedimento entre las secciones estrechas y las que no lo son (Figura 3).

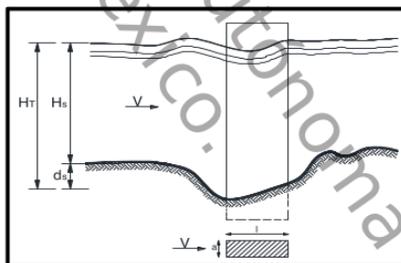


Figura 3 Socavación transversal

Erosión en las curvas. Consiste en un mayor incremento de la profundidad del fondo en la zona cercana a la orilla cóncava o exterior, como consecuencia de la corriente helicoidal que se forma por la sobreelevación del agua que produce una fuerza centrífuga. No se debe a factores humanos, aunque es muy importante tener en cuenta que dicha profundidad aumenta cuando se fija y estabiliza la orilla exterior con un revestimiento o protección marginal.



Normalmente las mayores profundidades se observan en la segunda mitad de aguas debajo de las curvas regulares. Sin embargo, como su posición depende de la dirección del flujo al entrar y recorrer la curva, en problemas prácticos se considera que pueden ocurrir en cualquier sección a lo largo de la curva (Figura 4).

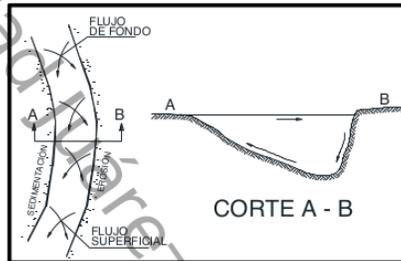


Figura 4 Socavación en curvas

Erosión local en pilas o erosión local al pie de obras rodeada por la corriente. Se conoce con este nombre a la erosión que ocurre al pie de toda las estructuras rodeadas completamente por el flujo, sobresalgan o no de la superficie. Se debe a la deflexión de las líneas de corriente, la turbulencia y los vórtices provocados por la presencia del obstáculo (Figura 5).

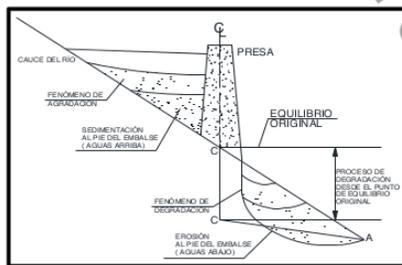


Figura 5 Socavación local al pie de obras rodeadas por las corrientes



2

Erosión local en estribos o erosión al pie de obras unidas a la margen. Es

la que tiene lugar al pie y en el extremo de las obras que están unidas a la orilla.

Su mecanismo de erosión es similar al de las pilas (Figura 6).



Figura 6 Socavación local al pie de obras unidas por la margen

Erosión aguas abajo de una presa. Con este nombre se conoce el descenso del fondo que resulta debido a la interrupción del transporte de sedimento provocada por la presencia de un embalse (Figura 7).

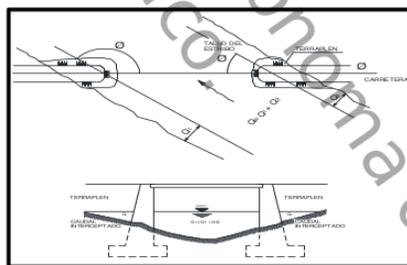


Figura 7 Socavación aguas abajo de las presas

Erosión local aguas debajo de tanques de descarga o deflectores. Como su nombre lo indica es la que ocurre aguas abajo de tanques amortiguadores cuando las secciones no están recubiertas con alguna protección o al pie de caídas producidas por saltos de sky o deflectores (Figura 8).



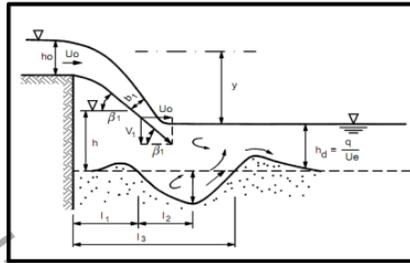


Figura 8 Socavación local aguas abajo de descargas de tanques o deflectores

Erosión aguas arriba de cortes de meandros y rectificaciones. Los fenómenos señalados incrementan la pendiente de un tramo de un río, por lo que produce un aumento de las velocidades del flujo y transporte de sedimento. El río tiende a tener un mayor transporte en esa zona, produciendo una erosión del fondo hasta que el río alcanza de nuevo su estado de equilibrio (Figura 9).

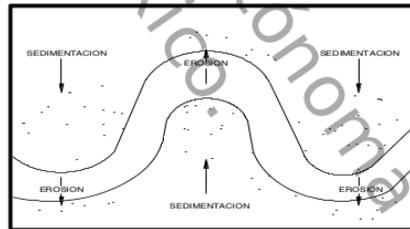


Figura 9 Socavación de aguas arriba de cortes de meandros y rectificaciones

Erosión bajo tubería. Se produce cuando una tubería o sifón colocado horizontalmente en el fondo interfiere con la dirección del escurrimiento. Para que la erosión del fondo se genere, se requiere que al menos la mitad del diámetro del tubo quede descubierto e interpuesto a la corriente (Figura 10).



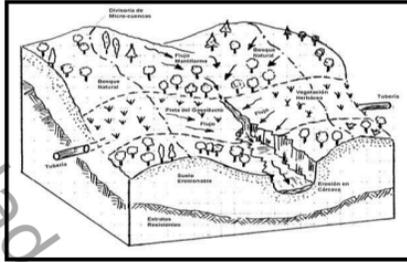


Figura 10 Socavación local bajo tuberías

1.2 Análisis de la socavación

La profundidad de la socavación se calcula utilizando relaciones empíricas, modelos físicos o simulaciones numéricas.

Entender el fenómeno de socavación, requiere un análisis cualitativo inicial, enfocado en los procesos físicos a escala de cuenca, tramo y sección transversal. La relación cualitativa propuesta por Lane (1955), aporta los elementos básicos para comprender los cambios o respuestas del río, ante cambios en sus condiciones de flujo y sedimentología (Barbosa, 2013). Lo que se traduce en procesos de erosión o sedimentación del fondo. En la Figura 11, se representa la analogía de un sistema fluvial como una balanza (Balanza de Lane). Ésta permite predecir la respuesta cualitativa de un cauce ante algún cambio que se presente en alguno de los elementos que lo componen. Considera cuatro variables agrupadas en dos grupos: a) variables de flujo: gasto líquido en metro cubico sobre segundo (q , gasto unitario) y pendiente del fondo m/m (S_0); y b) variables sedimentológicas: gasto solido en kilogramo sobre hora (q_s , gasto solido unitario que se mueve por el fondo), y el tamaño del sedimento (d_{50}) mm. Cuando ambos brazos están en posición horizontal, indica



que el río está en equilibrio. El desplazamiento del fiel de la balanza hacia un lado o el otro, indica un proceso de erosión o sedimentación.

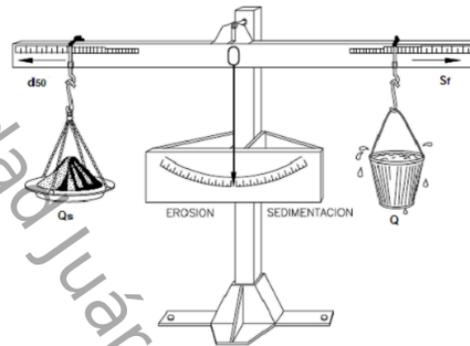


Figura 11 Analogía de la balanza de Lane (Barbosa, 2013)

1.2.1 Teoría del régimen

La teoría del régimen es una síntesis de conocimientos empíricos aplicable a la estabilidad de cauces en ríos que transportan sedimentos (Vide, 2003). La teoría refleja el acomodo o equilibrio dinámico del gasto sólido, el gasto líquido y la geometría hidráulica. Fue iniciada por Kennedy en 1895, quien durante el diseño de una red de canales no revestidos (erosionables), observó y midió las dimensiones de canales que ya habían estado en operación, y por lo tanto, su sección se había ajustado a unas dimensiones estables en función de los gastos que transportaban, tanto líquido como de sedimentos. Observó y midió las dimensiones de 22 canales del sistema Alto Bari en Doab, India y obtuvo una velocidad media en función del tirante (Maza y García, 1996; Barbosa, 2013).



La relación que encontró fue la siguiente:

$$V_m = 0.548y^{0.64} \quad (1)$$

En esta ecuación, V_m es la velocidad media de la corriente, está dada en metros sobre segundo; y es el tirante, está dado en metros.

En el año de 1919, Lindley utilizó por primera vez la palabra régimen. Indicó que un canal se encuentra en régimen cuando su sección y pendiente están en equilibrio con un gasto transportado, de tal manera que cuando hay un incremento o disminución de éste, hacen que el ancho y el tirante se modifiquen (Maza y Sánchez, 1964; Barbosa, 2013).

Posteriormente Kennedy en 1985, al igual que otros investigadores (Barbosa, 2013), comprobaron que el exponente y el coeficiente de la ecuación mostrada, variaba para canales de otras regiones. Por lo tanto, dicha ecuación se escribió de la siguiente manera general:

$$V_m = Cd^m \quad (2)$$

V_m representa la velocidad media en metros sobre segundo; C , es un coeficiente que varía de acuerdo a diferentes autores; 0.67 y 0.95 de acuerdo a Lacey (1930); 0.25 a 1.20 de acuerdo a Maza y Sánchez (1964); m , se refiere a un exponentes que varía entre 0.52 y 0.64 de acuerdo a Lacey (1930); 0.61 a 0.73 de acuerdo a Maza y Sánchez (1964); d , se refiere al diámetro del material y está dado en milímetros.

Por su parte, Lacey en los años de 1930 y 1958, basado en las observaciones de Kennedy, propuso una modificación a la teoría de régimen incluyendo el diámetro medio del material y la pendiente del cauce. Altuin en el año de 1962, propuso una teoría de régimen basado en datos y observaciones llevadas a



cabo en la Unión Soviética; cuyo interés principal se centró en ríos de grava y material grueso (Barbosa, 2013).

A partir de la década de los 50, surgió un nuevo enfoque para calcular la profundidad de socavación. Los desarrollos se basaron en el equilibrio entre la velocidad de flujo y la velocidad crítica de arrastre del material que conforma el fondo. Campa y Astorga (2015), destacan las formulaciones para socavación local de: Laursen y Toch (1953, 1956); adaptación de Neill (1964) al método de Laursen y Toch; Larrás (1963); Neill (1964); Arunachalam (1965, 1967); Carsten (1966); Maza Sánchez (1968); Breusers, Nicollet y Shen (1977); Melville y Sutherland (1988), Froehlich (1991). Por su parte, Barbosa (2013), menciona que para socavación general, se desarrollaron las metodologías de: Lischtvan – Levediev (1959) (para suelos granulares y para suelos cohesivos), Straub (1939), Laursen (1963) (socavación por contracción en agua clara y socavación por contracción en fondo móvil), Maza Álvarez (1973) y Neill (1980) por mencionar algunos.

En este trabajo se llevó a cabo la comparación entre fórmulas que permiten estimar la socavación general. Se seleccionaron los métodos de Lischtvan – Levediev, Maza Álvarez, Método generalizado, Laursen y Neill, debido a que siguen la teoría del régimen iniciada por Kennedy en 1895, además de que los datos de entrada son similares y fáciles de obtener.



CAPÍTULO II. MÉTODOS PARA ESTIMAR LA SOCAVACIÓN GENERAL

2.1 Método de Lischtvan-Lebediev (1959)

Para evaluar la socavación general en un cauce, uno de los métodos más populares es el de Lischtvan-Lebediev, (Maza y García, 1996). Este método determina la condición de equilibrio entre la velocidad media del cauce y la velocidad media del flujo que se requiere para no erosionar el material del fondo. Se representa de la siguiente manera e indica la finalización de la erosión en un cauce:

$$V_r = V_e \quad (3)$$

En la ecuación No. 3, V_r representa la velocidad media real del flujo, en metro sobre segundo; aplicado en una franja o línea vertical; la velocidad media que necesita el flujo para empezar a erosionar un material de fondo se establece como V_e , y está dada en metros sobre segundo.

En la determinación de la socavación (profundidad), se distinguen dos casos particulares, el primero para suelo friccionantes (no cohesivos) y el segundo para suelos no friccionante (cohesivos).

En su aplicación se requieren los siguientes datos:

- Gasto de diseño Q_d , en m^3s^{-1} .
- Periodo de retorno T_r , en años.
- Elevación de la superficie del agua en la sección de estudio.
- Perfil de la sección transversal o del tramo en estudio obtenido de la batimetría.



- Estratigrafía del material bajo el fondo del cauce (Estudio de geotecnia).
- Si el suelo es granular, la granulometría del material del fondo y el diámetro D_{84} , en mm.
- Si el suelo es cohesivo, el peso volumétrico seco γ_s del suelo en kg.m^{-3} .

2.1.1 Socavación general para suelo friccionante (arenas y gravas)

Si el tipo de suelo existente en la zona es friccionante, para determinar la profundidad de socavación (H_s), se aplicara la siguiente ecuación:

$$H_s = \left[\frac{\alpha H_0^{5/3}}{4.7 \beta D_{84}^{0.28}} \right] \frac{D_{84}^{0.03}}{0.322 + D_{84}^{0.03}} \quad (4)$$

En esta ecuación, H_s representa la profundidad después de producirse la socavación del fondo, su unidad es en metro; H_0 , representa la profundidad inicial en la sección analizada, su unidad es en metro; β , es un coeficiente que toma en cuenta el periodo de retorno T_r , asociado al gasto de diseño; D_{84} , es el diámetro característico de la partícula del material y está dado en milímetros. El coeficiente α , se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{Q_d}{\mu B_e y_m^{5/3}} \quad (5)$$

En la ecuación No.5, Q_d representa el gasto de diseño que se produce en la sección, su unidad está en metros cubico por segundo, y debe estar asociado a un periodo de retorno, T_r ; y_m , es el tirante medio en la sección, su unidad está en metros y se obtiene por la expresión:



$$y_m = \frac{A}{B_e} \quad (6)$$

En la ecuación No.6, A representa el área de la sección analizada, su unidad es en metros cuadrados; B_e , es el ancho efectivo de la superficie libre del cauce y está representada en metros. Cuando no hay obstáculos dentro del mismo, entonces B_e es igual al ancho efectivo del cauce.

En la ecuación No.5, μ es el ³ coeficiente de contracciones laterales del flujo, producido en las caras de las pilas, está en función de la velocidad media del flujo y del claro de las pilas; V , se refiere a la velocidad producida por la sección analizada y está dada en metros sobre segundo; B_e , es el ancho efectivo de la superficie libre del cauce y está representada en metros. Cuando no hay obstáculos dentro del mismo, entonces B_e es igual al ancho efectivo del cauce. La expresión queda presentada de la manera siguiente:

$$\mu = 1 - \frac{0.387V}{B_e} \quad (7)$$

En la ecuación No. 5, el coeficiente β se calcula con la siguiente expresión:

$$\beta = 0.8416 + 0.03342 \ln(\text{Tr}) \quad (8)$$

En la ecuación No.8, \ln representa el logaritmo natural y Tr el período de retorno en años asociado al gasto de diseño.



2.1.2 Socavación general para suelo no friccionante (arcilla y limos)

Si el tipo de suelo existente en las secciones de proyecto es del tipo fino, es decir, suelo cohesivo, el cálculo de la socavación general se realiza a partir de la siguiente ecuación:

$$H_s = \left[\frac{5780\alpha H_0^{5/3}}{\beta \gamma_d^{1.18}} \right] \frac{\gamma_d^{0.725}}{66.28 + \gamma_d^{0.725}} \quad (9)$$

En esta ecuación, H_s representa la profundidad después de producirse la socavación del fondo, su unidad es en metro; H_0 , representa la profundidad inicial en la sección analizada, su unidad es en metro; β , es un coeficiente que toma en cuenta el periodo de retorno Tr , asociado al gasto de diseño; γ_d , es el peso volumétrico seco del material del fondo del cauce, está dado en kilogramo sobre metro cubico. El coeficiente α , se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{Q_d}{\mu B_e y_m^{5/3}} \quad (10)$$

En la ecuación No.10, Q_d representa el gasto de diseño que se produce en la sección, su unidad está en metros cubico sobre segundo, y debe estar asociado a un periodo de retorno, Tr ; y_m , es el tirante medio en la sección, su unidad está en metros y se obtiene por la expresión:



$$y_m = \frac{A}{B_e} \quad (11)$$

En la ecuación No.11, A representa el área de la sección analizada, su unidad es en metros cuadrados; B_e , es el ancho efectivo de la superficie libre del cauce y está representada en metros. Cuando no hay obstáculos dentro del mismo, entonces B_e es igual al ancho efectivo del cauce.

En la ecuación No.9, μ es el coeficiente de contracciones laterales del flujo, producido en las caras de las pilas, está en función de la velocidad media del flujo y del claro de las pilas; V , se refiere a la velocidad producida por la sección analizada y está dada en metros sobre segundo; B_e , es el ancho efectivo de la superficie libre del cauce y está representada en metros. Cuando no hay obstáculos dentro del mismo, entonces B_e es igual al ancho efectivo del cauce. La expresión queda presentada de la manera siguiente:

$$\mu = 1 - \frac{0.387V}{B_e} \quad (12)$$

En la ecuación No. 9, el coeficiente β se calcula con la siguiente expresión

$$\beta = 0.8416 + 0.03342 \ln(\text{Tr}) \quad (13)$$

En la ecuación No.13, \ln representa el logaritmo natural y Tr el periodo de retorno en años asociado al gasto de diseño.



Para ambas consideraciones, este procedimiento se aplica en las dovelas en que se divide cada sección, obteniendo una profundidad de socavación H_s , en función de la profundidad inicial H_0 . Al unir todos los puntos encontrados, se genera el perfil teórico de la sección erosionada, tal como se muestra en la Figura 12.

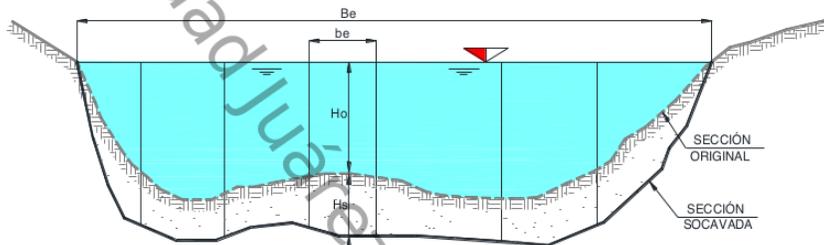


Figura 12 Sección transversal del cauce

2.2 Método de Maza (1968)

Maza (1968), propuso calcular la socavación general a partir de la igualdad de la velocidad real del flujo con la velocidad crítica de inicio del movimiento de las partículas del fondo (Aldana y Ordoñez, 2003).

Esta suposición se considera conservadora dado que el proceso de socavación general, no responde realmente a condiciones de desequilibrio morfológico en el sector de interés sino más bien a fluctuaciones de la carga sólida y desfases entre los hidrogramas de gasto líquido y sólido. Por lo tanto, no se puede suponer que el proceso siempre progresa hasta extinguir la capacidad de flujo para transportar sedimentos.

Maza propuso calcular el tirante o profundidad crítica (H_s), para la condición de equilibrio cuando la velocidad media del flujo iguala la velocidad media máxima



necesaria para no erosionar el material del fondo. Dicha condición teórica se representa por:

$$V_r = V_e \quad (14)$$

En la ecuación No.14, V_r representa la velocidad media real del flujo, en metro sobre segundo; aplicado en una franja o línea vertical; la velocidad media que necesita el flujo para empezar a erosionar un material de fondo se establece como V_e , y está dada en metros sobre segundo.

Se considera un gasto de diseño Q_d , (asociado a un período de retorno específico) su unidad es en metros cubico sobre segundo, y una velocidad media del flujo que disminuye a medida que se profundiza el fondo y aumenta el área hidráulica, su unidad es en metros sobre segundo. El área aumenta por el incremento de la profundidad del cauce, pero no por erosión lateral o ampliación del ancho, el cual se considera constante durante todo el paso de la avenida.

A continuación se presentan las ecuaciones de profundidad de socavación propuestas por Maza, las cuales fueron apoyadas en el criterio de Lischtvan-Lebediev.

$$\text{Si } 0.00005 < D_{84} < 0.0028 \text{ m} \quad H_s = \left[\frac{\alpha H_0^{5/3}}{4.7\beta D_{84}^{0.28}} \right] \frac{D_{84}^{0.03}}{0.322 + D_{84}^{0.03}} \quad (15)$$

$$\text{Si } 0.0028 < D_{84} < 0.182 \text{ m} \quad H_s = \left[\frac{\alpha H_0^{5/3}}{4.7\beta D_{84}^{0.28}} \right] \frac{D_{84}^{0.092}}{0.223 + D_{84}^{0.092}} \quad (16)$$



$$\text{Si } 0.182 < D_{84} < 1.0 \text{ m} \quad H_s = \left[\frac{\alpha H_0^{5/3}}{4.7\beta D_{84}^{0.28}} \right]^{0.191 + D_{84}^{0.187}} \quad (17)$$

En estas ecuaciones, H_s es la profundidad después de producirse la socavación del fondo, su unidad es en metro; H_0 , representa la profundidad inicial en la sección analizada, su unidad es en metro; β , es un coeficiente que toma en cuenta el periodo de retorno T_r , asociado al gasto de diseño; D_{84} , es el diámetro característico de la partícula del material y está dado en milímetros. El coeficiente α , se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{S^{1/2}}{n} = \frac{Q_d}{B_e y_m^{5/3}} \quad (18)$$

En la ecuación No.18, S representa la pendiente del cauce y su unidad está dada en porcentaje; n representa el coeficiente de rugosidad de Manning; Q_d , representa el gasto de diseño que se produce en la sección, su unidad está en metros cubico por segundo, y debe estar asociado a un periodo de retorno, T_r ; y_m , es el tirante medio en la sección, su unidad está en metros y se obtiene por la expresión:

$$y_m = \frac{A}{B_e} \quad (19)$$

En la ecuación No.19, A representa el área de la sección analizada, su unidad es en metros cuadrados; B_e , es el ancho efectivo de la superficie libre del cauce y está representada en metros. Cuando no hay obstáculos dentro del mismo, entonces B_e es igual al ancho efectivo del cauce.



En la ecuación No. 15, 16 y 17, el coeficiente β se calcula con la siguiente expresión

$$\beta = 0.8416 + 0.03342 \ln(\text{Tr}) \quad (20)$$

En la ecuación No.20, \ln representa el logaritmo natural y Tr el periodo de retorno en años asociado al gasto de diseño.

Al igual que el método propuesto por Lischtvan-Lebediev en 1959, este procedimiento se aplica en las dovelas en que se divide cada sección, obteniendo una profundidad de socavación H_s , en función de la profundidad inicial H_0 . Al unir todos los puntos encontrados, se genera el perfil teórico de la sección erosionada, tal como se muestra en la Figura 13.

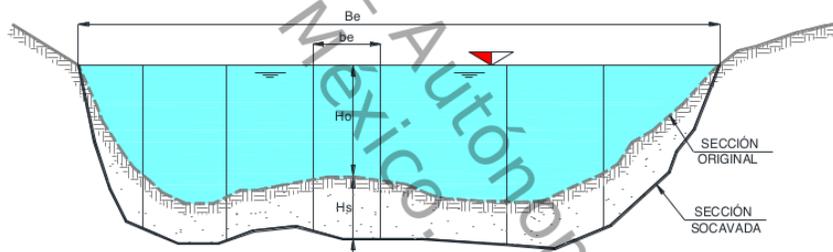


Figura 13 Sección transversal del cauce

2.3 Método de socavación de C.R. Neill (1973)

Este método sigue el concepto propuesto por los rusos Lischtvan-Lebediev. Sin embargo, C. R. Neill en 1973, consideró para su análisis lo que denominó velocidad competente (Jaramillo, 2013). Esta velocidad corresponde a la velocidad media en la subsección del cauce, que no genera socavación general del fondo. Si la velocidad del escurrimiento supera a la velocidad competente, el



cauce se erosiona hasta que la velocidad disminuye al valor correspondiente de la velocidad competente.

La determinación de la sección socavada de C.R. Neill, se realiza considerando de manera explícita su geometría, ya que de lo contrario el cálculo resulta demasiado aproximado. Se debe dividir la sección en dovelas o subsecciones como se indica en la Figura 14, y luego se determina en cada una de ellas la máxima altura de agua que iguala a la altura crítica de arrastre (H_s).

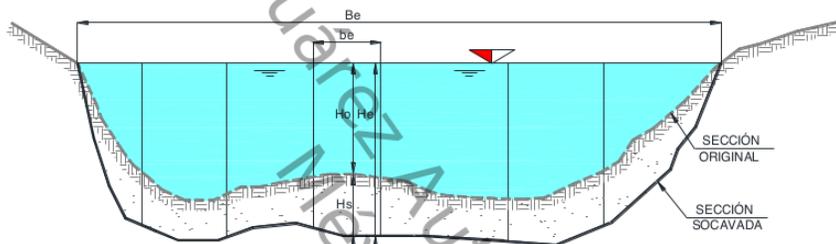


Figura 14 Sección transversal del cauce

La socavación de la dovela o subsección, denominada H_s , queda definida como:

$$H_e = H_s - H_0 \quad (21)$$

En la ecuación No.21, H_e representa la altura total del cauce una vez presentada la socavación, su unidad es en metros; H_s , representa la altura socavada, su unidad es en metros; H_0 , representa la altura del cauce antes de producirse el proceso de socavación, su unidad es en metros.



A continuación se presentan las ecuaciones No. 22 y 23, las cuales son obtenidas de despejar H_s de las ecuaciones de velocidad crítica.

Para sedimentos finos:

$$H_s \cdot \ln\left(\frac{12 \cdot H_s}{k_s}\right) = \frac{q_e}{0,787 \cdot \sqrt{g \cdot D}} \quad (22)$$

Para sedimentos gruesos:

$$H_s = \left(\frac{q_e}{1,81 \cdot \sqrt{g \cdot D^{0,33}}} \right)^{0,855} \quad (23)$$

En las ecuaciones No. 22 y 23, H_s representa la profundidad después de producirse la socavación del fondo, su unidad es en metros y es medida desde la elevación de la superficie del agua hasta el fondo del cauce; \ln , representa el logaritmo natural; k_s , es la aspereza o rugosidad determinante de la pérdida de carga; D , diámetro representativo del sedimento, su unidad es en metros; g , representa la aceleración de gravedad, su unidad es metro sobre segundo al cuadrado; q_e , representa el caudal por unidad de ancho asociado a la franja, su unidad es metro sobre segundo.

El gasto por unidad de ancho asociado a la franja (q_e), se calcula mediante la siguiente expresión:

$$q_e = \frac{Q_{de}}{b_e} = \frac{1}{b_e} \left(\frac{A_e}{A} \right) \cdot \left(\frac{R_e}{R} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{n}{n_e} \right) \cdot Q_{de} \quad (24)$$

En la ecuación No.24, Q_{de} representa el gasto por unidad de la franja y su unidad es en metros cúbicos por segundo; b_e , representa el ancho de la franja y su unidad es en metros; A_e , representa el área de la franja y su unidad es en metros cuadrados; R_e , representa el radio hidráulico de la franja; n_e , representa



la rugosidad de Manning en la franja; A, Q_d, n, R, representan las mismas variables, solo que para la sección total analizada.

2.4 Método de socavación de Laursen (1963)

Laursen en 1963, consideró que la socavación ocurre hasta que se alcanza las condiciones límites para las cuales la velocidad competente está en equilibrio con respecto a la velocidad media del flujo. La hipótesis fundamental establece que la distribución transversal de gasto es de una sección se mantiene invariable durante todo el desarrollo del proceso erosivo (Barbosa, 2013).

Para aplicar este método, la sección transversal de la Figura 15, se divide en dovelas e, con ancho b_e, profundidad hidráulica H₀ y profundidad de equilibrio H_s. Aplicando las ecuaciones de cantidad de movimiento y de continuidad, la velocidad V se puede expresarse de modo general como sigue (Schreider *et al.*, 2002):

$$V = \frac{q_e}{H_s} \quad (25)$$

Para la ecuación No.25, q_e representa el gasto unitario total de la franja y su unidad está en metros cubico sobre segundo; H_s, representa la altura de socavación producida por la avenida de diseño.

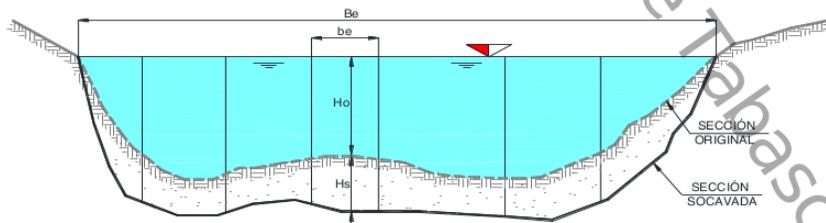


Figura 15 Sección transversal del cauce



En la evaluación de la velocidad crítica, diversos autores proponen ecuaciones empíricas en función de la profundidad de equilibrio y el diámetro característico del material del fondo.

En la Tabla 1, se presentan las cinco formulaciones empíricas seleccionadas en función de la velocidad crítica. Todas las expresiones presentadas en la Tabla 1, su unidad se encuentran en sistema métrico.

Tabla 1 Formulaciones para estimar la velocidad crítica. (Barbosa, 2013)

Autor	Formula
Maza Alvarez & Echavarría Alfaro (1973)	$V_c = 3.62 * d_{50}^{0.200} * h_s^{0.275}$
Lischtvan-Lebediev (1959)	$V_c = 4.70 * d_{50}^{0.280} * h_s^z$ $z = \frac{0.223}{d_{50}^{0.223}}$ $2.8 < d_{50}(\text{mm}) < 182$
Laursen (1963)	$V_c = 6.19 * d_{50}^{0.333} * h_s^{0.167}$
Maza Alvarez & García Flores (1978)	$V_c = 6.05 * d_{50}^{0.350} * h_s^{0.150}$
Neill (1980)	$V_c = 4.16 * d_{50}^{0.250} * h_s^X$ $X = \frac{0.125}{d_{50}^{0.180}}$ $0.3 < d_{50}(\text{mm}) < 30$ $V_c = 6.35 * d_{50}^{0.167} * h_s^{0.333}$ $d_{50}(\text{mm}) > 30$

Sin embargo, igualando las velocidades crítica presentadas en la Tabla 1, con la velocidad del flujo ($V_c = V$), es decir cuando el cauce alcanza el equilibrio en un gasto determinado, se puede expresar la profundidad de socavación mediante algunas transformaciones matemáticas considerando para ello que la



socavación general quedara en función del gasto unitario y del diámetro característico del fondo, tal como se presenta en la siguiente formula:

$$H_s = k * \frac{q_e^w}{D_{84}^z} \quad (26)$$

En la ecuación No.26, H_s representa la profundidad después de producirse la socavación del fondo, su unidad está en metros; q_e , representa el gasto unitario total de la franja, su unidad es en metros cubico sobre segundo; k , w , z , representan coeficientes aplicados para la teoría de régimen y a la velocidad competente; D_{84} , representa el diámetro característico de la partícula, su unidad es en metros.

Los valores de los coeficientes k , w y z , se presentan en la Tabla 2, y son utilizados por diferentes investigadores para estimar la profundidad de socavación general.

Tabla 2 Coeficientes para la velocidad competente (Barbosa, 2013)

Autores	k	w	z
Maza Alvarez & Echavarría Alfaro (1973)	0.365	0.784	0.157
Lischtvan-Lebediev (1959)	0.310	0.758	0.212
Laursen (1963)	0.210	0.857	0.285
Maza Alvarez & Garcia Flores (1978)	0.209	0.870	0.304
Neill (1980)	0.320	0.798	0.200
Lacey (1930)	0.351	0.667	0.167
Blench (1939)	0.692	0.667	0.083



2.5 Método generalizado (2003)

Fue propuesto por Farías en el 2003, y es aplicable para ríos arenosos. Este procedimiento al igual que la mayoría de los métodos empíricos, se basa en la igualdad que hay entre la velocidad media del flujo en una franja vertical (V_r) y la velocidad de equilibrio (V_e) la cual es utilizada para mantener un transporte sólido generalizado en el fondo.

Para calcular la socavación general, Farías consideró una serie de combinaciones relacionadas con las velocidades críticas y de equilibrio (Tabla 3), además de las formulaciones para calcular la resistencia al flujo (Tabla 4), Gasto de diseño, tamaño del sedimento y la sección inicial de cauce.

A continuación se presentan las ecuaciones y las tablas que son utilizadas para reproducir el método generalizado.

2.5.1 Velocidad crítica y de equilibrio

La ecuación que se presenta continuación, fue el resultado de combinar la fórmula de fricción de Manning-Strickler y el diagrama de Shield, (Farías *et al.*, 2003). La expresión se representada de la siguiente manera:

$$V_c = b_0 d^{b_1} H_0^{b_2} \quad (27)$$

De la ecuación No. 27, V_c representa la velocidad crítica del flujo, su unidad está en metros sobre segundo; b_0 , b_1 y b_2 , son constante numéricas las cuales se obtiene de la Tabla 3; H_0 , representa la profundidad inicial, su unidad está en metros.



A continuación se presenta la Tabla 3, con los valores de constantes numéricas reducidas al formato general.

Tabla 3 Formulas para velocidad critica (Fariás *et al.*, 2003)

Autores	b₀	b₁	b₂
Shamov	6.000	0.333	0.167
DoT-FHWA-HEC18	6.190	0.333	0.167
Maza A. – Echavarría A	3.620	0.200	0.275
Levi (aprox. pot)	8.290	0.357	0.156
Van Rijn (aprox. pot)	0.340	0.004	0.100
Lischtvan – Lebediev	4.700	0.280	0.410
Shields – Manning	6.093	0.283	0.167

2.5.2 Resistencia al flujo

Existen un gran número de ecuaciones para estimar la resistencia al flujo. Sin embargo, Fariás y Pilan en el 2000, presentaron un formato genérico en la forma de un producto de potencias y la expresaron de la siguiente manera:

$$V_r = a_0 d^{a_1} H_0^{a_2} S^{a_3} \quad (28)$$

De la ecuación No. 28, V_r , representa la velocidad de resistencia al flujo, su unidad está en metros sobre segundo; a_0 , a_1 , a_2 y a_3 , son constante numéricas; S , es la pendiente longitudinal del cauce, su unidad es en porcentaje; H_0 , representa la profundidad inicial, su unidad está en metros.

A continuación se presenta la Tabla 4, con los valores de constantes numéricas reducidas al formato general.



Tabla 4 Constante para la resistencia al flujo (Fariás *et al.*, 2003)

Autores	a₀	a₁	a₂	a₃
Manning-Strickler	21.100	-0.167	0.667	0.500
Pavlovsky-Lacey	17.810	-0.133	0.736	0.515
Sugio	7.900	0.000	0.540	0.270
Chitale	7.340	0.000	0.646	0.293
Maza-Cruickshank	495.850	0.340	0.637	0.456
Brownlie	13.290	-0.029	0.529	0.389
Peterson-Peterson	7.546	0.017	0.437	0.276
Karim-Kennedy	18.190	-0.103	0.603	0.497
Camacho-Yen	97.930	0.216	0.636	0.401
Fariás-Pilan	4.780	0.026	0.499	0.213

2.5.3 Profundidad de socavación

La expresión No.29, se aplica a cada franja vertical en la que se dividirá el cauce, y es utilizada para calcular la erosión general.

$$H_s = k_0 H_0^{k_1} \quad (29)$$

De la ecuación No.29, H_s representa la profundidad después de producirse la socavación del fondo, su unidad es en metros; k_0 y k_1 representan los elementos de rugosidad en el método de Mirtskhoulava; H_0 representa la profundidad inicial de la sección del cauce y su unidad está dada en metros.

A continuación se presentan las formulaciones que son utilizadas en el método generalizado, y que a su vez, son necesarias para encontrar la socavación general de la sección analizada.



$$k_0 = m_0 D^{m_1} \quad (30)$$

En la ecuación No.30, k_0 , representa elementos de rugosidad en el método de Mirskhoulava; m_0 y m_1 , representan coeficientes en el método de Mirskhoulava; D , representa el tamaño del sedimento, su unidad es en milímetros.

$$k_1 = \frac{(a_2+1)}{(b_2+1)} \quad (31)$$

En la ecuación No. 31, k_1 , representa elementos de rugosidad en el método de Mirskhoulava; a_2 , representa valores de constantes para la resistencia al flujo y son obtenidos de la Tabla 4; b_1 , representa valores de constantes para la velocidad crítica y son obtenidos de la Tabla 3.

$$m_0 = \left[\frac{\alpha_M}{b_0} \right] \left[\frac{1}{(b_2+1)} \right] \quad (32)$$

En la ecuación No. 32, m_0 , representan coeficientes en el método de Mirskhoulava; α_M , representa el coeficiente dependiente de las características hidráulicas; b_0 y b_2 , representan constante para la velocidad crítica y son obtenidos de la Tabla 3.

$$\alpha_M = \frac{Q_d}{[B_e H_0^{(a_2+1)}]} \quad (33)$$

En la ecuación No. 33, α_M , representa el coeficiente dependiente de las características hidráulicas; Q_d , representa el gasto de diseño que se produce en la sección, su unidad está en metros cubico por segundo, y debe estar asociado a un periodo de retorno, T_r ; B_e , representa el ancho efectivo de la superficie libre del cauce, su unidad es en metro. Cuando no hay obstáculos dentro del mismo, entonces B_e es igual al ancho efectivo del cauce; H_0 , representa la profundidad inicial de la sección del cauce y su unidad está dada en metros; a_2 ,



representa valores de constantes para la resistencia al flujo y son obtenidos de la Tabla 4.

$$m_1 = \frac{-b_1}{(b_2+1)} \quad (34)$$

En la ecuación No. 34, m_1 representan coeficientes en el método de Mirskhoulava; $-b_1$ y b_2 , representan constante para la velocidad crítica y son obtenidos de la Tabla 3.

En la ecuación No.35, y_m es el tirante medio en la sección, su unidad está en metros y se obtiene por la expresión:

$$y_m = \frac{A}{B_e} \quad (35)$$

En la ecuación No.35, A representa el área de la sección analizada, su unidad es en metros cuadrados; B_e , es el ancho efectivo de la superficie libre del cauce y está representada en metros. Cuando no hay obstáculos dentro del mismo, entonces B_e es igual al ancho efectivo del cauce.

Para aplicar este método, la sección transversal de la Figura 16, se divide en dovelas e , con ancho b_e , profundidad hidráulica H_0 y profundidad de equilibrio H_s . Aplicando las ecuaciones de cantidad de movimiento y de continuidad:

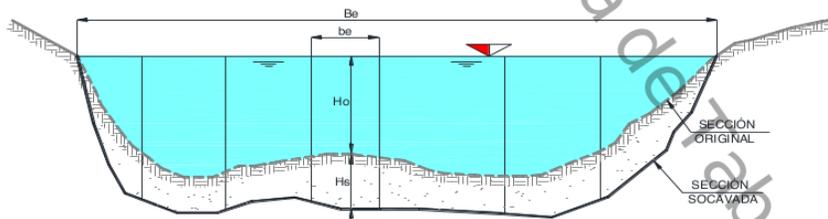


Figura 16 Sección transversal del cauce

En los capítulos siguientes se presentaran las metodologías de cálculo de socavación general aplicado a un caso real.



CAPÍTULO III. CASO DE APLICACIÓN

3.1 Zona de Estudio

Para estudiar y predecir el comportamiento de los diferentes métodos empíricos de socavación aplicados a un caso real, se analizó un proyecto de cruzamiento direccional de un gasoducto de 36"Ø, el cual cruzará un río con una longitud de 800 m. La zona del proyecto se ubica sobre el río Mezcalapa, Ranchería Paredón-Macayo, perteneciente al municipio de Huimanguillo, estado de Tabasco, ver Figura 17, 18 y 19.



Figura 17 Ubicación de zona de estudio (Google Earth)



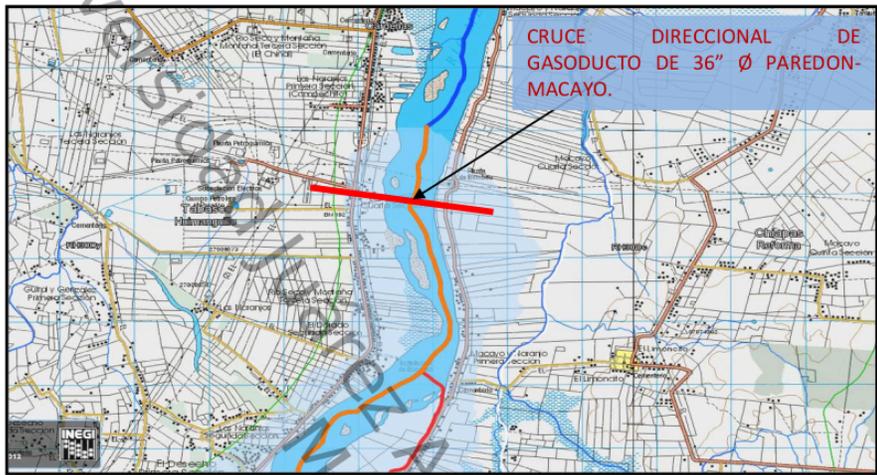


Figura 18 Ubicación a detalle de cruce direccional (SIATL, INEGI)

Hidrográficamente, esta zona se ubica en la subcuenca del río Mezcalapa (RH30Dc) comprendida dentro de la cuenca del río Grijalva-Villahermosa (RH-30D) la cual posee una superficie equivalente al 41.45% del total de Tabasco. Los coeficientes de escurrimiento que prevalecen en la región van de 20 a 30 %. Esta cuenca es la más importante del Estado en función del desarrollo urbano-industrial y petrolero; los usos principales a que se destina el agua superficial es la navegación, y abastecimiento a los principales centro de poblaciones e industrial (INEGI).





Figura 19 Margen Izquierda del río Mezcalapa (Zona de cruzamiento)

3.2 Recopilación de datos de entrada

Se contó con información real de campo y gabinete consistente en: topografía, batimetría, mecánica de suelos, hidrología e hidráulica; dichos estudios fueron realizados por la Cía. Grupo de Ingeniería y Construcción Zeta, S.A. de C.V., en el año 2013.

Los datos necesarios para la aplicación de los distintos métodos son los siguientes:

- Batimetría y sección transversal tipo

Se realizó una batimetría con una longitud de ocho kilómetros sobre el río Mezcalapa, (Figura 17 y 18). Se obtuvieron en campo la configuración del fondo



del cauce, el ancho del río y la elevación de la lámina de agua. Los cadenamientos se realizaron a cada 100 m. sobre una poligonal de apoyo, la cual se ubicó sobre la margen derecha del río mencionado.

Para el análisis de cálculo, se eligió como sección transversal tipo, la ubicada en el Km-3+686.77, ver Figura 20. Es en esta sección donde se realizó el cruzamiento direccional de un gasoducto de 36" ϕ .

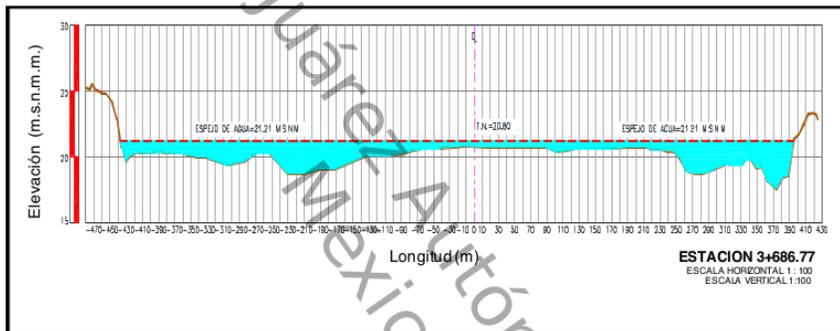


Figura 20 Sección Transversal Tipo. Cadenamiento 3+686.77

- Diámetro característico (D)

Para conocer el diámetro característico del material se realizaron cinco sondeos en la zona de estudio y se generaron las curvas granulométricas. Se identificó de cada sondeo, el diámetro característico D_{84} , tal como se presenta en las Figuras 21, 22, 23, 24 y 25. Se estimó un diámetro promedio con los datos encontrados, ver Tabla 5. Estimando un valor $D_{84}=0.54$ mm.



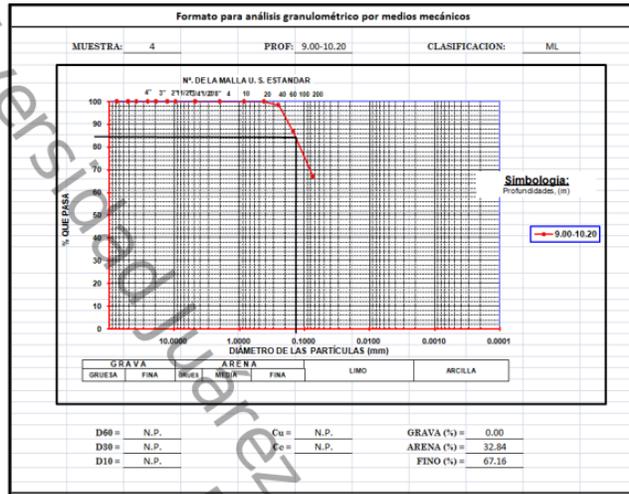


Figura 21 Análisis Granulometrico del material (SM-1) Cadenamiento 3+686.77

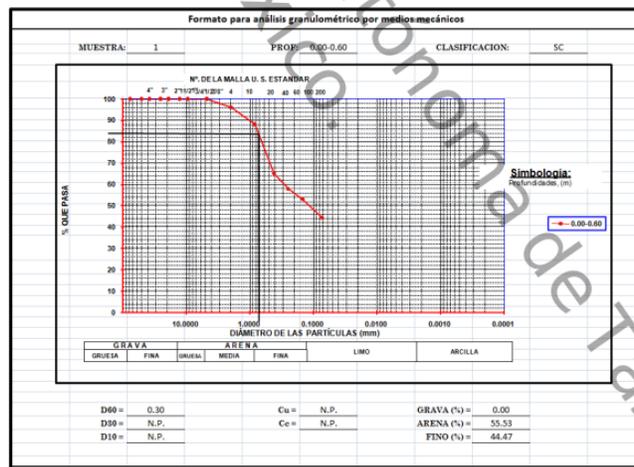


Figura 22 Análisis Granulometrico del material (SM-2) Cadenamiento 3+686.77



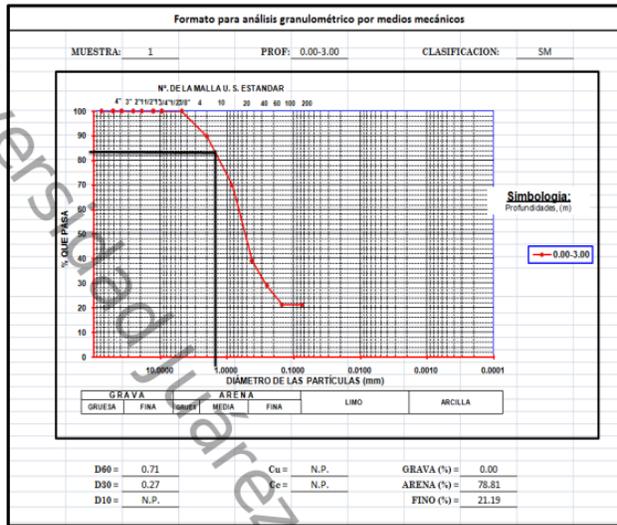


Figura 23 Análisis Granulometrico del material (SM-3) Cadenamiento 3+686.77

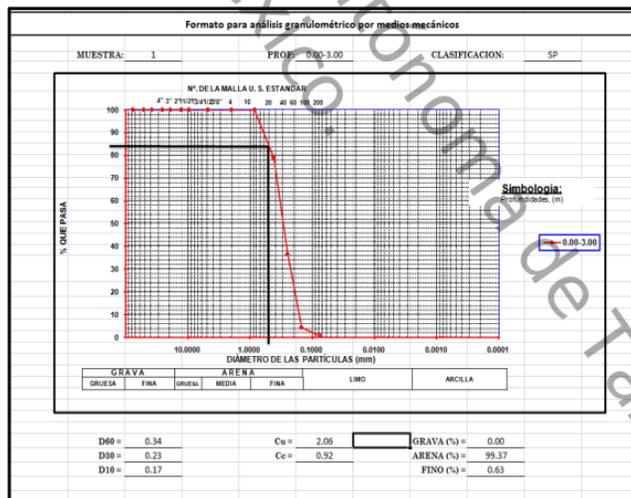


Figura 24 Análisis Granulometrico del material (SM-4) Cadenamiento 3+686.77



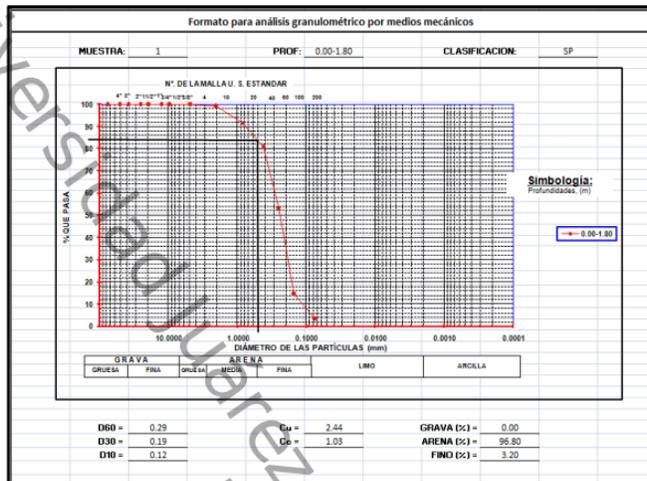


Figura 25 Análisis Granulométrico del material (SM-5) Cadenamiento 3+686.77

A continuación se presenta la Tabla 5, con un resumen de los datos obtenido de cada sondeo.

Tabla 5 Diámetros Característicos

Sondeos	D ₈₄ (mm)
SM-1	0.10
SM-2	0.18
SM-3	1.30
SM-4	0.45
SM-5	0.65
Promedio	0.54



- Gasto de diseño

El gasto de diseño, corresponde a un a un periodo de retorno $T_r=100$ Años, y fue de $Q=5048.35 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (GICZE, 2013).

- Coeficiente de rugosidad de Manning "n"

Se utilizó el criterio Cowan, (Ven Ten Chow, 1994). Se determinaron los coeficiente de rugosidad de Manning "n" = 0.033 para el fondo y "n"=0.045 para ambas márgenes. Estos datos fueron utilizados en la aplicación de los métodos de socavación.

- Pendiente hidráulica "S"

Esta se obtuvo de levantar topográficamente niveles de espejo de agua del río Mezcalapa. De acuerdo al estudio, se realizaron los levantamientos en los kilometrajes 3+583.45 y 3+783.45, teniendo como longitud particular del cauce 200 metros.

Tabla 6 Pendiente Hidráulica en Río Mezcalapa

Elevación Aguas Arriba	Elevación Aguas Abajo
$h_1 = 21.293 \text{ msnm}$	$h_2 = 21.211 \text{ msnm}$
Pendiente Hidráulica (S)	
$S = 0.00041$	



A continuación se presentan la Tabla 7, con los datos necesarios que se requieren para desarrollar los métodos de cálculo de socavación.

Tabla 7 Datos de entrada

Concepto	Cantidad
Estación de la sección analizada	3+686.77 m
Periodo de retorno (Tr)	100 Años
Gasto de diseño (Qd)	5048.35 m ³ s ⁻¹
Área hidráulica (A)	4029.07 m ²
Velocidad en la sección analizada (V)	1.26 ms ⁻¹
Velocidad particular en dovelas (Ve)	Ve= 0.40 ms ⁻¹ y Ve=1.40 ms ⁻¹
Profundidad Inicial (H ₀)	H ₀ = Colocar las profundidades que componen la sección analizada. m
Tirante medio (y _m)	4.58 m
Diámetro característico (D ₈₄)	0.00054 m
Gravedad (g)	9.81 ms ⁻²
Ancho de la superficie del agua (B _e)	879.39 m
Coefficiente de rugosidad de Manning (n)	n= 0.033 para el fondo y n=0.045 para ambas márgenes
Pendiente Hidráulica (S)	S = 0.00041



3.3 Metodología de cálculo

En este apartado se presentará la metodología y los criterios utilizados para obtener la socavación general empleando los métodos seleccionados.

Como parte primordial, la sección transversal analizada se deberá dividir en dovelas o subsecciones como se indica en la Figura 26. Posteriormente, se determinará la máxima socavación en cada una de las dovelas, utilizando para ello, las fórmulas de socavación de los métodos analizados.

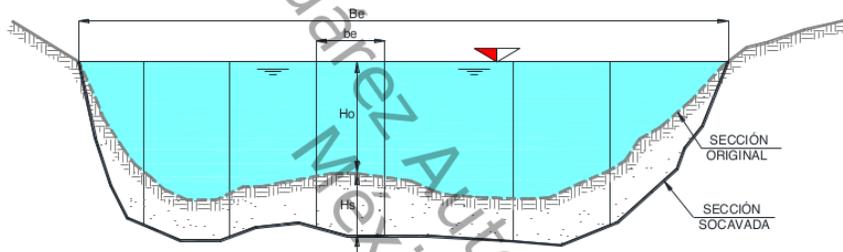


Figura 26 Sección transversal del cauce

Con fines prácticos se asignó un identificador a cada uno de los métodos seleccionados, tal como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8 Identificación de los métodos

Métodos	Identificación
Lischtvan-Lebediev (1959)	L - L
Maza Álvarez (1968)	M
Neill (1973)	N
Laursen (1963)	L
Método generalizado (2003)	MG



3.3.1 Método de Lischtván – Lebediev (L – L)

Como datos de entrada se requiere lo siguiente: Cadenamiento de la sección analizada, periodo de retorno (T_r), gasto de diseño (Q_d), profundidad inicial (H_0), diámetro característico (D_{84}), área hidráulica (A), velocidad del cauce (V), ancho de la superficie del agua (B_e). Adicional a estos datos, se deberán calcular el tirante medio (y_m), los coeficientes α y β y la socavación (H_s); estos datos son obtenidos con las formulas No. 4, 5, 6, 7 y 8, los cuales son presentados en el capítulo II.

A partir de esta metodología, se construyó una tabla de cálculo en una hoja de Excel con el fin de agilizar y conocer los resultados de socavación en cada dovela de la sección analizada.

Tabla 9 Cálculo de socavación general (L-L)

ESTACIÓN	PERIODO DE RETORNO	GASTO DE DISEÑO	PROFUNDIDAD INICIAL	TIRANTE MEDIO	DIÁMETRO DE LA PARTÍCULA	ÁREA HIDRÁULICA	ANCHO DE LA SUPERFICIE LIBRE DEL AGUA	COEFICIENTE	COEFICIENTE	PROFUNDIDAD SOCAVADA
	(T_r)	(Q_d)	(H_0)	(y_m)	(D_{84})	(A)	(B_e)	(α)	(β)	(H_s)
	AÑOS	(m^3/s)	(m)	(m)	(m)	(m^2)	(m)	adimensional	adimensional	(m)

3.3.2 Método de Maza Álvarez (M)

Este método es similar al de L– L, no por ello se dejó de revisar, y por lo tanto, sólo se recomienda poner atención en la elección del tipo de fórmula de socavación la cual está relacionada con el valor del diámetro de la partícula.

Como datos de entrada se requiere lo siguiente: Cadenamiento de la sección analizada, periodo de retorno (T_r), gasto de diseño (Q_d), profundidad inicial (H_0), diámetro característico (D_{84}), área hidráulica (A), velocidad del cauce (V), ancho de la superficie del agua (B_e). Adicional a estos datos, se deberán calcular el tirante medio (y_m), los coeficientes α y β y la socavación (H_s); estos datos son obtenidos con las formulas No. 15, 16, 17, 18, 19, 20 los cuales son presentados en el capítulo II.



A partir de esta metodología, se construyó una tabla de cálculo en una hoja de Excel con el fin de agilizar y conocer los resultados de socavación en cada dovela de la sección analizada.

Tabla 10 Cálculo de socavación general. (M)

ESTACIÓN	PERIODO DE RETORNO (Tr) AÑOS	GASTO DE DISEÑO (Qd) (m³/s)	PROFUNDIDAD INICIAL (Ho) (m)	TIRANTE 'MEDIO' (ym) (m)	DIÁMETRO DE LA PARTICULA (D84) (m)	ÁREA HIDRAULICA (A) (m²)	ANCHO DE LA SUPERFICIE LIBRE DEL AGUA (Be) (m)	COEFICIENTE	COEFICIENTE	PROFUNDIDAD SOCAVADA (Hs) (m)
								(α)	(β)	
								adimensional	adimensional	

3.3.3 Método de C.R Neill (N)

Como datos de entrada se requiere lo siguiente: Cadenamiento de la sección analizada, periodo de retorno (Tr), gasto de diseño (Qd), profundidad inicial (Ho), diámetro característico (D84), área hidráulica (A), ancho de la superficie del agua (Be), coeficiente de rugosidad de Manning (n), velocidad de distribución de la sección (Ve) y gravedad (g). Adicional a estos datos, se deberán calcular el ancho de la franja (be), área de la franja (Ae), gasto por unidad de franja (Qde), gasto unitario por unidad de franja (qe) y la socavación (Hs); estos datos son obtenidos de la siguiente manera:



Ancho de la franja (b_e); se obtendrá de la sección transversal analizada. El número de dovelas de la sección, dependerá de la discretización del diseñador. Algunas maneras de obtener esta longitud es utilizando el programa AutoCad, CivilCad o el Software de análisis hidráulico HEC-RAS.

Área de la franja (A_e); se obtendrá el área para cada dovela analizada, utilizando la fórmula de un trapecio ya que la dovela no se comporta de forma rectangular.

Gasto por unidad de franja (Q_{de}), se calcula con la ecuación de continuidad, tomándose los datos las áreas de cada dovela (A_e) y las velocidades de distribución de la sección (V_e).

Gasto unitario por unidad de franja (q_e), se calcula con la ecuación No.24, presentado en el capítulo II:

A partir de esta metodología, se construyó una tabla de cálculo en una hoja de Excel con el fin de agilizar y conocer los resultados de socavación en cada dovela de la sección analizada.

Tabla 11 Cálculo de socavación general (N)

ESTACION	PERIODO DE RETORNO	GASTO DE DISEÑO	PROFUNDIDAD INICIAL	ANCHO DE LA SUPERFICIE LIBRE DEL AGUA	ÁREA HIDRÁULICA	DIAMETRO DE LA PARTICULA	ANCHO DE LA FRANJA	ÁREA DE LA FRANJA	FRANJA	DE MANNING	VELOCIDAD	GRAVEDAD	GASTO POR UNIDAD DE FRANJA	GASTO UNITARIO	PROFUNDIDAD SOCAVADA
	(Tr)	(Qd)	(Ho)	(Be)	(A)	(D84)	(be)	(Ae)		(n)	(Ve)	(g)	(Qde)	(qe)	(Hs)
	Años	(m ³ /s)	(m)	(m)	(m ²)	(m)	(m)	(m ²)		adimensional	(m/s)	(m/s ²)	(m ³ /s)	(m ³ /s/m)	(m)



3.3.4 Método de Laursen (L)

Este método es similar al de C.R. Neill, no por ello se dejó de revisar, y por lo tanto, sólo se recomienda poner atención en la elección de los coeficientes k , w , z , y por último en la fórmula de calcular la socavación.

Como datos de entrada se requiere lo siguiente: Cadenamiento de la sección analizada, periodo de retorno (T_r), gasto de diseño (Q_d), profundidad inicial (H_0), diámetro característico (D_{84}), área hidráulica (A), ancho de la superficie del agua (B_e), coeficiente de rugosidad de Manning (n), velocidad de distribución de la sección (V_e) y gravedad (g). Adicional a estos datos, se deberán calcular el ancho de la franja (b_e), área de la franja (A_e), gasto por unidad de franja (Q_{de}), gasto unitario por unidad de franja (q_e), coeficientes k, w, z , y la socavación (H_s); estos datos son obtenidos de la siguientes manera:

Ancho de la franja (b_e); se obtendrá de la sección transversal analizada. El número de dovelas de la sección, dependerá de la discretización del diseñador. Algunas maneras de obtener esta longitud es utilizando el programa Autocad, Civilcad o el Software de análisis hidráulico HEC-RAS.

Área de la franja (A_e); se obtendrá el área para cada dovela analizada, utilizando la fórmula de un trapecio ya que la dovela no se comporta de forma rectangular.

Gasto por unidad de franja (Q_{de}), se calcula con la ecuación de continuidad, tomándose los datos las áreas de cada dovela (A_e) y las velocidades de distribución de la sección (V_e).

Gasto unitario por unidad de franja (q_e), se calcula con la ecuación No.24, presentado en el capítulo II.

Coefficientes k, w, z , son obtenidos de la Tabla No.2, presentada en el capítulo II.



A partir de esta metodología, se construyó una tabla de cálculo en una hoja de Excel con el fin de agilizar y conocer los resultados de socavación en cada dovela de la sección analizada.

Tabla 12 Cálculo de socavación general (L)

ESTACIÓN	PERÍODO DE RETORNO	GASTO DE DISEÑO	PROFUNDIDAD INICIAL	ANCHO DE LA SUPERFICIE LIBRE DEL AGUA	ÁREA HIDRÁULICA	DIÁMETRO DE LA PARTICULA	ANCHO DE LA FRANJA	ÁREA DE LA FRANJA	RUGOSIDAD DE MANNING	VELOCIDAD	GASTO POR UNIDAD DE FRANJA	COEFICIENTE	COEFICIENTE	COEFICIENTE	GASTO UNITARIO	PROFUNDIDAD SOCAVADA
	(Tr)	(Qd)	(H ₀)	(B _e)	(A)	(D ₈₄)	(B _e)	(A _e)	(n)	(V _e)	(Q _{de})	(k)	(w)	(z)	(q _e)	(H _s)
	Años	(m ³ /s)	(m)	(m)	(m ²)	(m)	(m)	(m ²)	adimensional	(m ³ /s)	(m ³ /s)	adimensional	adimensional	adimensional	(m ³ /s/m)	(m)

3.3.5 Método Generalizado

Como datos de entrada se requiere lo siguiente: Cadenamiento de la sección analizada, gasto de diseño (Q_d), profundidad inicial (H₀), diámetro característico (D₈₄), área hidráulica (A), ancho de la superficie del agua (B_e). Adicional a estos datos, se deberán calcular el tirante medio (y_m), los elementos de rugosidad (k₀ y k₁), coeficientes (m₀ y m₁), coeficiente dependiente de las características hidráulica (α_M), valores para la resistencia al flujo (a₀, a₁, a₂, a₃), valores para la velocidad crítica (b₀, b₁, b₂) y la socavación (H_s); estos datos son obtenidos con las formulas No. 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34 y 35, los cuales son presentados en el capítulo II.

Los valores para la resistencia al flujo (a₀, a₁, a₂, a₃), son obtenidos de la Tabla 4, presentada en el capítulo II.



A partir de esta metodología, se construyó una tabla de cálculo en una hoja de Excel con el fin de agilizar y conocer los resultados de socavación en cada dovela de la sección analizada.

Tabla 13 Cálculo de socavación general (MG)

Datos de Entrada									
Estación	Gasto de diseño (Gd) (m ³ /s)	Área hidráulica (A) (m ²)	Área de la superficie libre del agua (A ₀) (m ²)	Dímetro de la particula (D84) (mm)	Triante medio (mm)	Profundidad inicial (m)	Profundidad inicial (No) (m)	Profundidad inicial (No) (m)	Profundidad inicial (No) (m)
1	James Strickler	21.1	-0.167	0.657	0.5	6	0.333	0.167	
	Manning-Strickler	21.1	-0.167	0.657	0.5	6.19	0.33	0.167	
	Manning-Strickler	21.1	-0.167	0.657	0.5	3.58	0.2	0.172	
	Manning-Strickler	21.1	-0.167	0.657	0.5	8.29	0.34	0.156	
	Manning-Strickler	21.1	-0.167	0.657	0.5	4.7	0.28	0.41	
2	Brownlie	13.29	-0.029	0.529	0.389	6	0.333	0.167	
	Brownlie	13.29	-0.029	0.529	0.389	6.19	0.333	0.167	
	Brownlie	13.29	-0.029	0.529	0.389	3.68	0.2	0.275	
	Brownlie	13.29	-0.029	0.529	0.389	8.29	0.357	0.156	
	Brownlie	13.29	-0.029	0.529	0.389	4.7	0.28	0.41	
3	Karrin & Kennedy	18.19	-0.103	0.603	0.497	6	0.333	0.167	
	Karrin & Kennedy	18.19	-0.103	0.603	0.497	6.19	0.333	0.167	
	Karrin & Kennedy	18.19	-0.103	0.603	0.497	3.62	0.2	0.275	
	Karrin & Kennedy	18.19	-0.103	0.603	0.497	8.29	0.357	0.156	
	Karrin & Kennedy	18.19	-0.103	0.603	0.497	0.34	0.004	0.1	
4	Peterson & Peterson	7.546	0.017	0.437	0.276	6	0.333	0.167	
	Peterson & Peterson	7.546	0.017	0.437	0.276	6.19	0.333	0.167	
	Peterson & Peterson	7.546	0.017	0.437	0.276	3.62	0.2	0.275	
	Peterson & Peterson	7.546	0.017	0.437	0.276	8.29	0.357	0.156	
	Peterson & Peterson	7.546	0.017	0.437	0.276	0.34	0.004	0.1	
5	James & Phlan	4.78	0.026	0.499	0.213	6	0.333	0.167	
	James & Phlan	4.78	0.026	0.499	0.213	6.19	0.333	0.167	
	James & Phlan	4.78	0.026	0.499	0.213	3.58	0.17	0.172	
	James & Phlan	4.78	0.026	0.499	0.213	8.29	0.34	0.156	
	James & Phlan	4.78	0.026	0.499	0.213	4.7	0.28	0.41	

Método Generalizado

COMBINACIÓN	FORMULA Vc	Formula Vc	a0	a1	a2	a3	a4	b1	b2	am	an	m0	m1	m2	k1	Hs (m)	Hs (m)	Hs (m)	...n
1	James & Phlan	James & Phlan	4.78	0.026	0.499	0.213	6	0.333	0.167										
2	Brownlie	Brownlie	13.29	-0.029	0.529	0.389	6	0.333	0.167										
3	Karrin & Kennedy	Karrin & Kennedy	18.19	-0.103	0.603	0.497	6	0.333	0.167										
4	Peterson & Peterson	Peterson & Peterson	7.546	0.017	0.437	0.276	6	0.333	0.167										
5	James & Phlan	James & Phlan	4.78	0.026	0.499	0.213	6	0.333	0.167										



CAPÍTULO IV. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de los métodos seleccionados, aplicando todos y cada uno de los antecedentes recopilados y descritos en los capítulos anteriores. Los resultados obtenidos, son presentados en hojas de cálculos de Excel, las cuales fueron diseñadas para cada uno de los métodos analizados. Así mismo, y para mayor visualización de los resultados, se presenta una gráfica con el comportamiento general de los métodos.

4.1 Método Lischtván - Lebediev

Tabla 14 Resultado de Socavación General (L – L) Cadenamiento 3+686.77

ESTACIÓN	PERIODO DE RETORNO	GASTO DE DISEÑO	PROFUNDIDAD INICIAL	TIRANTE MEDIO	DIAMÉTRO DE LA PARTÍCULA	ÁREA HIDRÁULICA	ANCHO DE LA SUPERFICIE LIBRE DEL AGUA	COEFICIENTE	COEFICIENTE	PROFUNDIDAD SOCAVADA
	(Tr) AÑOS	(Qd) (m³/s)	(Ho) (m)	(ym) (m)	(D84) (m)	(A) (m²)	(Be) (m)	(α) adimensional	(β) adimensional	(Hs) (m)
3+686.77	100	5048.35	1.92	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	1.84
3+686.77	100	5048.35	1.54	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	1.42
3+686.77	100	5048.35	1.55	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	1.43
3+686.77	100	5048.35	1.43	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	1.30
3+686.77	100	5048.35	1.43	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	1.30
3+686.77	100	5048.35	1.43	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	1.30
3+686.77	100	5048.35	1.43	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	1.31
3+686.77	100	5048.35	1.45	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	1.32
3+686.77	100	5048.35	1.45	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	1.33
3+686.77	100	5048.35	2.23	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	2.20
3+686.77	100	5048.35	2.23	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	2.20
3+686.77	100	5048.35	2.28	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	2.27
3+686.77	100	5048.35	3.00	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	3.14
3+686.77	100	5048.35	3.01	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	3.15
3+686.77	100	5048.35	3.36	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	3.60
3+686.77	100	5048.35	3.37	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	3.60
3+686.77	100	5048.35	6.18	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	7.40
3+686.77	100	5048.35	6.18	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	7.40
3+686.77	100	5048.35	6.18	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	7.40
3+686.77	100	5048.35	6.28	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	7.55
3+686.77	100	5048.35	6.29	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	7.56
3+686.77	100	5048.35	7.18	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	8.85
3+686.77	100	5048.35	7.18	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	8.85
...

Como se puede apreciar en la Tabla 14, solo se presenta una parte de los resultados del método de socavación general de Lischtván - Lebediev; el tamaño de la tabla depende de la longitud del cauce. Los resultados de la socavación



general son los presentados en la columna de profundidad socavada (Hs); nótese que los resultados son positivos, lo cual indica que se está presentando socavación en el tramo analizado. La tabla mostrada se construyó con los datos de entrada presentados en la Tabla 7. Se puede apreciar que hay datos constantes los cuales son requeridos para alimentar las ecuaciones de cálculo programadas en la hoja de cálculo.

4.2 Método Maza Álvarez

Tabla 15 Resultado de Socavación General (M) Cadenamiento 3+686.77

ESTACIÓN	PERIODO DE RETORNO	GASTO DE DISEÑO	PROFUNDIDAD INICIAL	TIRANTE MEDIO	DIAMÉTRO DE LA PARTICULA	ÁREA HIDRÁULICA	ANCHO DE LA SUPERFICIE LIBRE DEL AGUA	COEFICIENTE	COEFICIENTE	PROFUNDIDAD SOCAVADA
	(Tr)	(Qd)	(Ho)	(ym)	(D84)	(A)	(Be)	(α)	(β)	(Hs)
	AÑOS	(m³/s)	(m)	(m)	(m)	(m²)	(m)	adimensional	adimensional	(m)
3+686.77	100	5048.35	1.92	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	1.84
3+686.77	100	5048.35	1.54	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	1.42
3+686.77	100	5048.35	1.55	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	1.43
3+686.77	100	5048.35	1.43	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	1.30
3+686.77	100	5048.35	1.43	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	1.30
3+686.77	100	5048.35	1.43	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	1.30
3+686.77	100	5048.35	1.43	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	1.31
3+686.77	100	5048.35	1.45	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	1.32
3+686.77	100	5048.35	1.45	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	1.33
3+686.77	100	5048.35	2.23	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	2.20
3+686.77	100	5048.35	2.23	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	2.20
3+686.77	100	5048.35	2.28	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	2.27
3+686.77	100	5048.35	3.00	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	3.14
3+686.77	100	5048.35	3.01	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	3.15
3+686.77	100	5048.35	3.36	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	3.60
3+686.77	100	5048.35	3.37	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	3.60
3+686.77	100	5048.35	6.18	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	7.40
3+686.77	100	5048.35	6.18	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	7.40
3+686.77	100	5048.35	6.18	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	7.40
3+686.77	100	5048.35	6.28	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	7.55
3+686.77	100	5048.35	6.29	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	7.56
3+686.77	100	5048.35	7.18	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	8.85
3+686.77	100	5048.35	7.18	4.58	0.00054	4029.07	879.39	0.454	0.996	8.85
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
....n	....n	....n	....n	....n	....n	....n	....n	....n	....n	....n

Como se puede apreciar en la Tabla 15, se presenta una parte de los resultados del método de socavación general de Maza Álvarez; el tamaño de la tabla depende de la longitud del cauce. Los resultados de la socavación general son los presentados en la columna de profundidad socavada (Hs); nótese que los



resultados son positivos, lo cual indica que se está presentando socavación en el tramo analizado; se puede apreciar que los datos de los resultados son similares a los de la Tabla 14, esto, debido al tipo de material y la formulación seleccionada. La tabla mostrada se construyó con los datos de entrada presentados en la Tabla 7. Se puede apreciar que hay datos constantes los cuales son requeridos para alimentar las ecuaciones programadas en la hoja de cálculo.

4.3 Método de C.R. Neill

Tabla 16 Resultado de Socavación General (N) Cadenamiento 3+686.77

ESTACIÓN	PERIODO DE RETORNO (Tr)	GASTO DE DISEÑO (Qd) (m ³ /s)	PROFUNDIDAD INICIAL (Ho) (m)	ANCHO DE SUPERFICIE LIBRE DEL AGUA (Lb) (m)	ÁREA HIDRÁULICA (A) (m ²)	DIÁMETRO DE LA PARTICULA (D84) (m)	ANCHO DE LA FRANJA (Lb) (m)	ÁREA DE LA FRANJA (Ae) (m ²)	RUGOSIDAD DE MANNING (n) adimensional	VELOCIDAD (Vc) (m/s)	GASTO POR UNIDAD DE FRANJA (Qbf) (m ³ /s)	GRAVEDAD (g) (m/s ²)	GASTO UNITARIO (q) (m ³ /s/m)	PROFUNDIDAD SOCAVADA (hs) (m)
3+686.77	100	5048.35	1.92	879.39	4029.07	0.00054	10.000	17.28	0.045	0.40	1.725	9.81	0.69	0.88
3+686.77	100	5048.35	1.54	879.39	4029.07	0.00654	10.000	19.44	0.045	0.40	1.111	9.81	0.62	0.43
3+686.77	100	5048.35	1.55	879.39	4029.07	0.00984	10.000	14.88	0.045	0.40	1.746	9.81	0.60	0.42
3+686.77	100	5048.35	1.43	879.39	4029.07	0.00054	10.000	14.22	0.045	0.40	1.006	9.81	0.57	0.41
3+686.77	100	5048.35	1.43	879.39	4029.07	0.00054	10.000	14.31	0.045	0.40	1.175	9.81	0.57	0.41
3+686.77	100	5048.35	1.43	879.39	4029.07	0.00054	10.000	14.42	0.045	0.40	1.569	9.81	0.58	0.41
3+686.77	100	5048.35	1.45	879.39	4029.07	0.00054	10.000	18.38	0.033	1.40	15.083	9.81	9.57	9.47
3+686.77	100	5048.35	1.45	879.39	4029.07	0.00054	10.000	22.36	0.033	1.40	1.931	9.81	3.15	1.73
3+686.77	100	5048.35	2.23	879.39	4029.07	0.00054	10.000	25.43	0.033	1.40	1.295	9.81	3.70	2.01
3+686.77	100	5048.35	2.28	879.39	4029.07	0.00054	10.000	30.05	0.033	1.40	19.407	9.81	4.21	2.24
3+686.77	100	5048.35	3.01	879.39	4029.07	0.00054	10.000	31.86	0.093	1.40	0.168	9.81	4.46	2.35
3+686.77	100	5048.35	3.36	879.39	4029.07	0.00054	10.000	33.65	0.033	1.40	28.364	9.81	4.71	2.47
3+686.77	100	5048.35	3.37	879.39	4029.07	0.00054	10.000	47.72	0.033	1.40	47.614	9.81	5.68	3.33
3+686.77	100	5048.35	6.18	879.39	4029.07	0.00054	10.000	61.79	0.033	1.40	0.086	9.81	8.65	4.15
3+686.77	100	5048.35	6.18	879.39	4029.07	0.00054	10.000	62.31	0.033	1.40	0.087	9.81	8.72	4.18
3+686.77	100	5048.35	6.28	879.39	4029.07	0.00054	10.000	62.84	0.033	1.40	61.041	9.81	8.80	4.21
3+686.77	100	5048.35	6.29	879.39	4029.07	0.00054	10.000	67.34	0.033	1.40	71.829	9.81	9.43	4.47
3+686.77	100	5048.35	7.18	879.39	4029.07	0.00054	10.000	71.81	0.033	1.40	0.593	9.81	10.05	4.72
....n	....n	....n	....n	....n	....n	....n	....n	....n	....n	....n	....n	....n	....n	....n



Como se puede apreciar en la Tabla 16, solo se presenta una parte de los resultados del método de socavación general de C.R. Neill; el tamaño de la tabla depende de la longitud del cauce. Los resultados de la socavación general son los presentados en la columna de profundidad socavada (Hs); nótese que los resultados son positivos, lo cual indica que se está presentando socavación en el tramo analizado. La tabla mostrada se construyó con los datos de entrada presentados en la Tabla 7. Los datos de las columnas de velocidad (Ve) y rugosidad de Manning (n) fueron obtenidos de la simulación hidráulica realizada en el software HEC-RAS Ver. 4.1.0. Se puede apreciar que hay datos constantes los cuales son requeridos para alimentar las ecuaciones programadas en la hoja de cálculo.

4.4 Método de Laursen

Tabla 17 Resultado de Socavación General (L) Cadenamiento 3+686.77

ESTACION	PERIODO DE RETORNO (Tr) años	GASTO DE DISEÑO (Qd) (m³/s)	PROFUNDIDAD INICIAL (Hs) (m)	ANCHO DE LA SUPERFICIE DEL AGUJA (Bt) (m)	ÁREA HIDRÁULICA (A) (m²)	DIAMETRO DE LA PARTICULA (D84) (m)	ANCHO DE LA FRANJA (Bf) (m)	ÁREA DE LA FRANJA (Af) (m²)	RUGOSIDAD DE MANNING (n) adimensional	VELOCIDAD (Vc) (m/s)	GASTO POR UNIDAD DE FRANJA (Qbf) (m³/s/m)	COEFICIENTE (k) adimensional	COEFICIENTE (w) adimensional	COEFICIENTE adimensional	GASTO UNITARIO (q) (m³/s/m)	PROFUNDIDAD SOCAVADA (Hs) (m)
3+686.77	100	5048.35	1.92	879.39	4029.07	0.00054	10.000	17.78	0.045	0.40	1.225	0.21	0.86	0.29	0.69	1.31
3+686.77	100	5048.35	1.54	879.39	4029.07	0.00054	10.000	15.44	0.045	0.40	1.111	0.21	0.86	0.29	0.62	1.19
3+686.77	100	5048.35	1.55	879.39	4029.07	0.00054	10.000	14.88	0.045	0.40	1.746	0.21	0.86	0.29	0.60	1.15
3+686.77	100	5048.35	1.43	879.39	4029.07	0.00054	10.000	14.27	0.045	0.40	0.006	0.21	0.86	0.29	0.57	1.11
3+686.77	100	5048.35	1.43	879.39	4029.07	0.00054	10.000	14.27	0.045	0.40	0.006	0.21	0.86	0.29	0.57	1.11
3+686.77	100	5048.35	1.43	879.39	4029.07	0.00054	10.000	14.41	0.045	0.40	1.529	0.21	0.86	0.29	0.58	1.12
3+686.77	100	5048.35	1.45	879.39	4029.07	0.00054	10.000	14.51	0.045	0.40	0.018	0.21	0.86	0.29	0.58	1.12
3+686.77	100	5048.35	1.45	879.39	4029.07	0.00054	10.000	18.39	0.033	1.40	15.901	0.21	0.86	0.29	2.57	4.03
3+686.77	100	5048.35	2.23	879.39	4029.07	0.00054	10.000	22.26	0.033	1.40	0.031	0.21	0.86	0.29	3.12	4.75
3+686.77	100	5048.35	2.23	879.39	4029.07	0.00054	10.000	22.55	0.033	1.40	8.795	0.21	0.86	0.29	3.16	4.80
3+686.77	100	5048.35	2.28	879.39	4029.07	0.00054	10.000	26.43	0.033	1.40	19.407	0.21	0.86	0.29	3.70	5.50
3+686.77	100	5048.35	3.00	879.39	4029.07	0.00054	10.000	31.06	0.033	1.40	20.844	0.21	0.86	0.29	4.12	6.16
3+686.77	100	5048.35	3.36	879.39	4029.07	0.00054	10.000	33.65	0.033	1.40	0.187	0.21	0.86	0.29	4.71	6.77
3+686.77	100	5048.35	3.37	879.39	4029.07	0.00054	10.000	47.72	0.033	1.40	47.614	0.21	0.86	0.29	6.68	9.13
3+686.77	100	5048.35	6.18	879.39	4029.07	0.00054	10.000	61.79	0.033	1.40	0.086	0.21	0.86	0.29	8.65	11.39
3+686.77	100	5048.35	6.18	879.39	4029.07	0.00054	10.000	61.80	0.033	1.40	0.087	0.21	0.86	0.29	8.65	11.39
3+686.77	100	5048.35	6.18	879.39	4029.07	0.00054	10.000	62.31	0.033	1.40	61.041	0.21	0.86	0.29	8.72	11.47
3+686.77	100	5048.35	6.28	879.39	4029.07	0.00054	10.000	62.94	0.033	1.40	0.352	0.21	0.86	0.29	8.80	11.56
3+686.77	100	5048.35	6.28	879.39	4029.07	0.00054	10.000	62.94	0.033	1.40	0.352	0.21	0.86	0.29	8.80	11.56
3+686.77	100	5048.35	7.18	879.39	4029.07	0.00054	10.000	71.81	0.033	1.40	0.503	0.21	0.86	0.29	10.05	12.96
.....



Como se puede apreciar en la Tabla 17, solo se presenta una parte de los resultados del método de socavación general de Laursen; el tamaño de la tabla depende de la longitud del cauce. Los resultados de la socavación general son los presentados en la columna de profundidad socavada (Hs); nótese que los resultados son positivos pero con datos de altura de socavación muy altas, lo cual indica que se está presentando depósito del material en el tramo analizado. La tabla mostrada se construyó con los datos de entrada presentados en la Tabla 7. Los datos de las columnas de velocidad (Ve) y rugosidad de Manning (n) fueron obtenidos de la simulación hidráulica realizada en el software HEC-RAS Ver. 4.1.0. Se puede apreciar que hay datos constantes los cuales son requeridos para alimentar las ecuaciones programadas en la hoja de cálculo.



4.5 Método Generalizado

Tabla 18 Resultado de Socavación General (MG) Cadenamiento 3+686.77

Estacion	Gasto de diseño (Qd) (m³/s)	Área hidráulica (A) (m²)	Diámetro de la partícula (D84) (mm)	Tramete medio (mm)	Profundidad de socavación										
					inicial (Ho) (m)	intermedia (Hi) (m)	final (Hf) (m)	inicial (Ho) (m)	intermedia (Hi) (m)	final (Hf) (m)					
3+686.77	5048.35	4029.07	0.00054	4.58	1.87	1.54	1.55	-	-	-	-	-	-	-	-

COMBINACIÓN	FORMULA VC	Fórmula Ve	Método Generalizado																	
			i0	i1	i2	a3	a0	bi	bs	lm	m0	m1	ks	kl	hs	h3	h2	h1	h0	
1	Manning-Strickler	Shamov	2.11	-0.167	0.667	0.5	0.333	0.167	0.65	0.11	-0.29	0.94	1.43	2.38	1.74	1.75	-	-	-	-
	Manning-Strickler	Doi-RHWA-HEC 18	2.11	-0.167	0.667	0.5	0.333	0.167	0.65	0.11	-0.29	0.94	1.43	2.38	1.74	1.75	-	-	-	-
	Manning-Strickler	Maza A - Echavarría	2.11	-0.167	0.667	0.5	0.333	0.167	0.65	0.11	-0.29	0.94	1.43	2.38	1.74	1.75	-	-	-	-
	Manning-Strickler	Levi	2.11	-0.167	0.667	0.5	0.333	0.167	0.65	0.11	-0.29	0.94	1.43	2.38	1.74	1.75	-	-	-	-
	Manning-Strickler	Van Rijn	2.11	-0.167	0.667	0.5	0.333	0.167	0.65	0.11	-0.29	0.94	1.43	2.38	1.74	1.75	-	-	-	-
2	Manning-Strickler	Uschvarev - Lebedev	2.11	-0.167	0.667	0.5	0.333	0.167	0.65	0.11	-0.29	0.94	1.43	2.38	1.74	1.75	-	-	-	-
	Manning-Strickler	Shamov	13.29	-0.029	0.529	0.389	0.333	0.167	0.56	0.13	-0.29	1.12	1.31	2.63	1.97	1.99	-	-	-	-
	Manning-Strickler	Doi-RHWA-HEC 18	13.29	-0.029	0.529	0.389	0.333	0.167	0.56	0.13	-0.29	1.12	1.31	2.63	1.97	1.99	-	-	-	-
	Manning-Strickler	Maza A - Echavarría	13.29	-0.029	0.529	0.389	0.333	0.167	0.56	0.13	-0.29	1.12	1.31	2.63	1.97	1.99	-	-	-	-
	Manning-Strickler	Levi	13.29	-0.029	0.529	0.389	0.333	0.167	0.56	0.13	-0.29	1.12	1.31	2.63	1.97	1.99	-	-	-	-
3	Manning-Strickler	Van Rijn	13.29	-0.029	0.529	0.389	0.333	0.167	0.56	0.13	-0.29	1.12	1.31	2.63	1.97	1.99	-	-	-	-
	Manning-Strickler	Uschvarev - Lebedev	13.29	-0.029	0.529	0.389	0.333	0.167	0.56	0.13	-0.29	1.12	1.31	2.63	1.97	1.99	-	-	-	-
	Manning-Strickler	Shamov	18.19	-0.103	0.603	0.497	0.333	0.167	0.50	0.12	-0.29	1.02	1.37	2.49	1.84	1.86	-	-	-	-
	Manning-Strickler	Doi-RHWA-HEC 18	18.19	-0.103	0.603	0.497	0.333	0.167	0.50	0.12	-0.29	1.02	1.37	2.49	1.84	1.86	-	-	-	-
	Manning-Strickler	Maza A - Echavarría	18.19	-0.103	0.603	0.497	0.333	0.167	0.50	0.12	-0.29	1.02	1.37	2.49	1.84	1.86	-	-	-	-
4	Manning-Strickler	Levi	18.19	-0.103	0.603	0.497	0.333	0.167	0.50	0.12	-0.29	1.02	1.37	2.49	1.84	1.86	-	-	-	-
	Manning-Strickler	Van Rijn	18.19	-0.103	0.603	0.497	0.333	0.167	0.50	0.12	-0.29	1.02	1.37	2.49	1.84	1.86	-	-	-	-
	Manning-Strickler	Uschvarev - Lebedev	18.19	-0.103	0.603	0.497	0.333	0.167	0.50	0.12	-0.29	1.02	1.37	2.49	1.84	1.86	-	-	-	-
	Manning-Strickler	Shamov	7.546	0.017	0.437	0.276	0.333	0.167	0.64	0.15	-0.29	1.27	1.23	2.82	2.15	2.17	-	-	-	-
	Manning-Strickler	Doi-RHWA-HEC 18	7.546	0.017	0.437	0.276	0.333	0.167	0.64	0.15	-0.29	1.27	1.23	2.82	2.15	2.17	-	-	-	-
5	Manning-Strickler	Maza A - Echavarría	7.546	0.017	0.437	0.276	0.333	0.167	0.64	0.15	-0.29	1.27	1.23	2.82	2.15	2.17	-	-	-	-
	Manning-Strickler	Levi	7.546	0.017	0.437	0.276	0.333	0.167	0.64	0.15	-0.29	1.27	1.23	2.82	2.15	2.17	-	-	-	-
	Manning-Strickler	Van Rijn	7.546	0.017	0.437	0.276	0.333	0.167	0.64	0.15	-0.29	1.27	1.23	2.82	2.15	2.17	-	-	-	-
	Manning-Strickler	Uschvarev - Lebedev	7.546	0.017	0.437	0.276	0.333	0.167	0.64	0.15	-0.29	1.27	1.23	2.82	2.15	2.17	-	-	-	-
	Manning-Strickler	Shamov	4.78	0.026	0.489	0.213	0.333	0.167	0.59	0.14	-0.29	1.17	1.28	2.69	2.03	2.05	-	-	-	-



Como se puede apreciar en la Tabla 18, solo se presenta una parte de los resultados del método de socavación Generalizado; el tamaño de la tabla depende de la longitud del cauce. Los resultados de la socavación general son los presentados en la columna de profundidad socavada (Hs); nótese que los resultados son positivos, lo cual indica que se está presentando socavación en el tramo analizado; las cinco combinaciones dan la pauta para elegir socavaciones máximas y mínimas. La tabla mostrada se construyó con los datos de entrada presentados en la Tabla 7. Los datos de la profundidad inicial (H₀), dependerán del número de dovelas en que se haya dividido la sección analizada. Se puede apreciar que hay datos constantes los cuales son requeridos para alimentar las ecuaciones programadas en la hoja de cálculo.

Tabla 19 Alturas de profundidades de socavación y deposito (máximos y mínimos).

TIPO DE METODOS	(L-L)	(M)	(N)	(L)	(MG)
SOCAVACION (+)	0.14 A 1.67	0.14 A 1.67	-	0.24 A 5.97	0.06 A 1.56
DEPOSITO MATERIAL (-)	-0.14	-0.14	-0.07 A -2.62	-0.32 A -0.61	-0.08 A -0.13

Apoyados con los resultados de las Tablas de la 14 a la 18, se graficaron los valores de las profundidades tal como se muestra en la Figura 27, con la finalidad de conocer y observar el comportamiento del fondo una vez aplicado los cinco métodos seleccionados.



Socavación del Río Mezcalapa KM-3+686.77

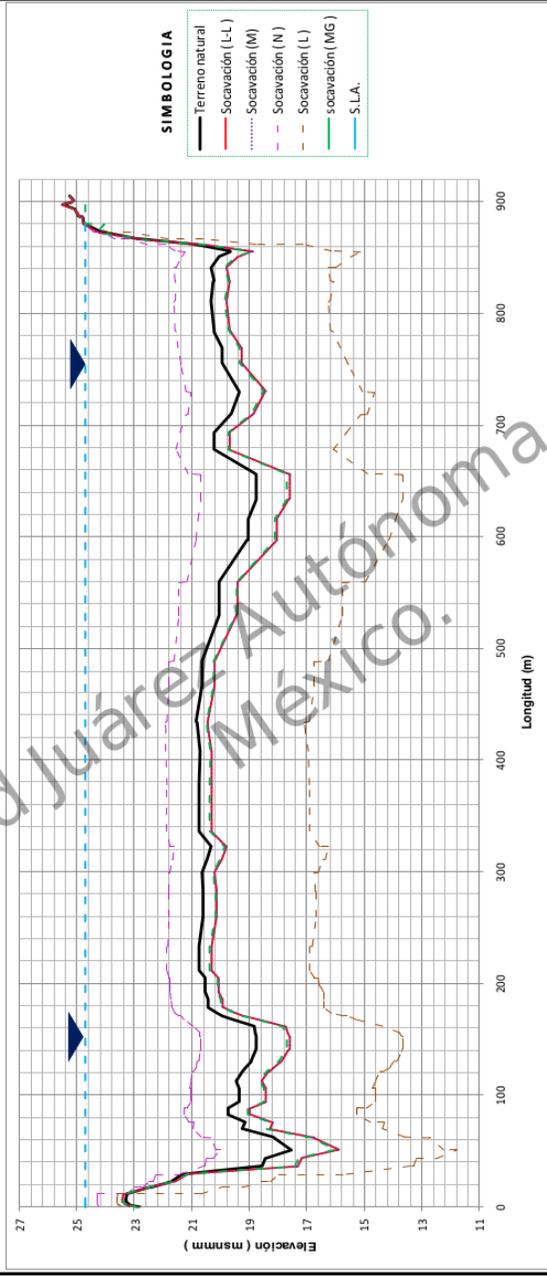


Figura 27 Comparativa de Socavación general.



Como se puede observar en la Figura 27, los cinco métodos empíricos analizados muestran comportamientos similares con respecto a la configuración del fondo principal. Sin embargo, cuatro de ellos presentan el proceso de socavación (+) y sólo uno, considera en su análisis, depósito (-) de material.

Los cuatro primeros métodos que presentan socavación general son: Lischtván–Lebediev (L-L), Maza Álvarez (M), Método Generalizado (MG) y Laursen (L). Sin embargo, y de acuerdo a las Figuras 19 y 20, el método de Lischtván–Lebediev (L-L) y Maza Álvarez (M), presentan resultados de socavación similares en su comportamiento. Por su parte, el Método Generalizado (MG), es el más conservador, ya que su comportamiento con respecto a los métodos anteriores es el que menos subestima la socavación general. Se puede apreciar en las Figuras 27 y 28, que la aplicación del método de Laursen (L), tiende sistemáticamente a sobreestimar la socavación con respecto a los métodos anteriores. Por último, se observa en las Figuras 27 y 28, que el método de socavación de C.R. Neill (N), no presenta socavación, pero esta tiende a presentar depósito de material en la sección analizada.

Con la finalidad de observar el comportamiento de las alturas de socavación de los métodos aplicados, se presentan a continuación la Figura 28, la cual representa las alturas de socavación obtenidas a partir de las diferencias de niveles del fondo socavado y el nivel de aguas máximas extraordinarias de la sección de proyecto analizada.



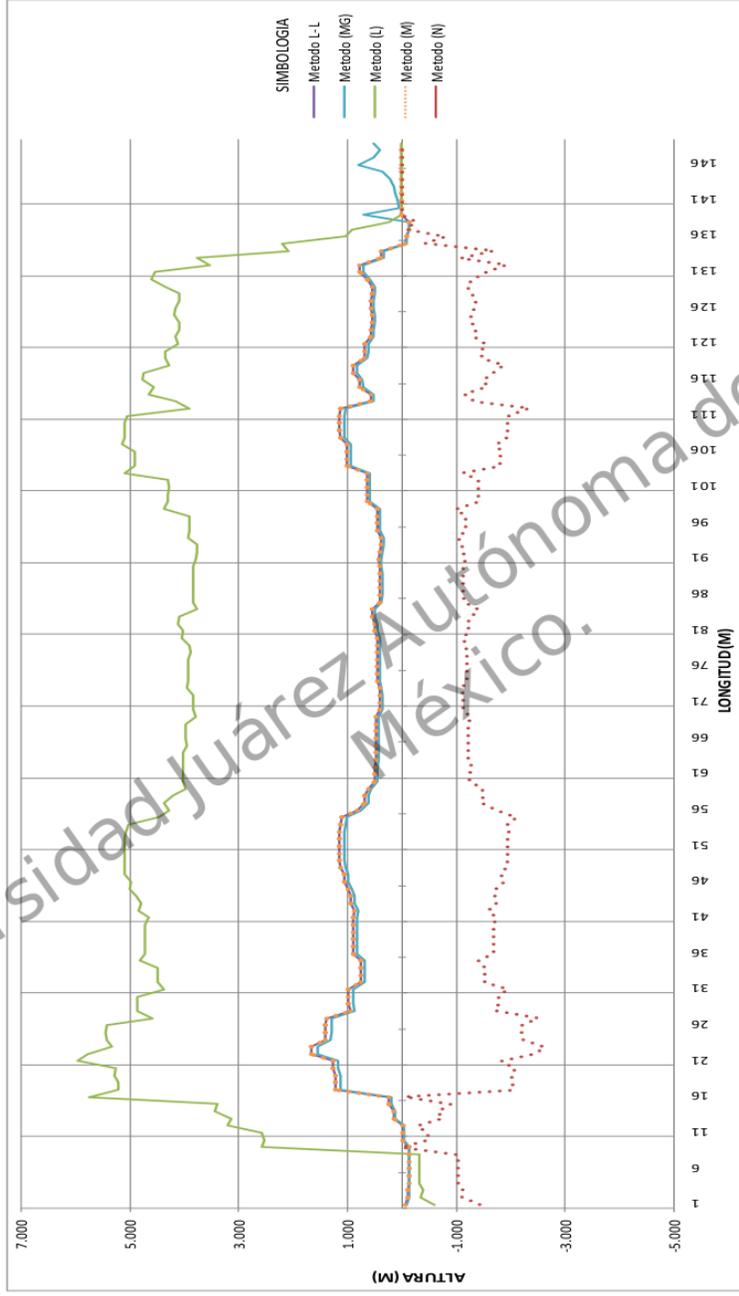


Figura 28 Comparativa de Alturas de socavación (L-L, MG, L, M, N)



Se observar en la Figura 28, que las alturas de profundidad de socavación de los métodos de L-L, M y MG, son positivas (socavación) en la sección del cauce y negativas (deposito) en los hombros de la sección, además de presentar una configuración similar. Sin embargo, y de acuerdo a la interpretación de los resultados de socavación, el método de L-L y M, además de coincidir en su formulación, ambas tienen una altura de socavación máxima de 1.67 metros y una mínima de 0.14 metros. Caso contrario del método de MG, ya que se observa que esta mantiene un comportamiento similar a las dos anteriores pero con datos de alturas de socavación menores a las antes mencionadas; dicha diferencia se debe principalmente a su formulación; como dato de altura máxima se tiene 1.56 metros y una mínima de 0.06 metros. El método de L, aunque siguiendo el mismo patrón de socavación es el que presenta la mayor altura de socavación (+). Esto se observó al compararlo con los tres métodos antes mencionado; su altura máxima es de 5.97 metros y un mínimo de 0.24 metros. Por último, se observa que al graficar las alturas de socavación del método de N, estas tienen un comportamiento totalmente diferente con respecto a los métodos de L-L, M, MG y L. Observamos principalmente, que los valores de los resultados se encuentran por debajo de línea de referencia cero, lo que nos lleva a interpretar que con este método, no se está presentando el proceso de socavación general (+), en este caso, su comportamiento obedece totalmente a un depósito (-) de material en el fondo del cauce; la altura máxima de depósito es de 2.62 metros y una mínima de 0.07 metros.



CAPÍTULO V. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

Se compararon cinco métodos empíricos de socavación general basados en la teoría del régimen y que consideran para su análisis la igualdad entre la velocidad media del cauce y la velocidad no erosiva llamada por algunos autores velocidad competente.

De la comparación de los resultados de socavación presentada en las Figuras 27, 28 y Tabla 19, se concluye lo siguiente:

- Las ecuaciones empíricas de socavación general, a pesar de depender todas del gasto unitario, presentan cada una de ellas comportamientos diferentes. Esto se debe, a que si bien, algunos métodos son similares en su metodología, estos varían de acuerdo a las aportaciones realizadas por cada autor.
- El método de Lischtván–Lebediev, el cual es de los más populares, presenta profundidades de socavación que oscilan en un rango mínimo de 0.14 metros y un máximo de 1.67 metros. Los depósitos de material se presentan en los hombros de la sección y oscilan en rangos mínimo de -0.07 metros y un máximo de -0.14 metros. Por lo que se observa, que los resultados de este método, se comportan de manera muy conservador comparados con los métodos analizados en este trabajo.
- El método de Maza Álvarez, presenta resultados de socavación similares al método de Lischtván–Lebediev. Esto debido a que el diámetro característico utilizado para esta tesis fue un promedio de los sondeos realizados el cual dio un resultado $D_{84}=0.00054$ metros. Al comparar el dato con las formulaciones propuesta por Maza Álvarez, está se ubicó en el rango de la condicionante siguiente: $0.00005 < D_{84} < 0.0028$ metros; La



condicionante dio la pauta para seleccionar el tipo de fórmula propuesta por Maza Álvarez, que a su vez, coincidió con la fórmula propuesta por Lischtvan–Lebediev.

- El método de Neill, no presenta socavación general en la sección analizada. Sin embargo, se observó un depósito de material con una altura mínima de -0.07 metros y una máxima de -2.62 metros. Podemos atribuir lo anterior a que en este método no se produjo la socavación debido a que la velocidad real del flujo no superó la velocidad máxima erosiva (velocidad competente). En este caso las velocidades reales del flujo son muy bajas ya que oscila entre 0.60 metros sobre segundo y 1.40 metros sobre segundo.
- El método de Laursen, presentó los mayores resultados de socavación, con valores oscilan en un rango de 0.24 metros a 5.97 metros. Este método en comparación con los métodos de Lischtvan–Lebediev, Maza Álvarez y Método Generalizado, tiende a socavar los hombros y barrotes de la sección.
- El Método Generalizado, fue el que obtuvo los menores resultados de socavación. Presentó profundidades que oscilan en un rango de 0.06 metros a 1.56 metros, los depósitos de material se presentan en los hombros de la sección y oscilan en rangos de -0.08 metros a -0.13 metros. Este método de acuerdo a su metodología de cálculo tiene la flexibilidad de elegir entre treinta posibles combinaciones con valores mínimos y máximos de socavación.
- Considerando los resultados de los métodos analizados, podemos concluir que todos son de gran utilidad a la hora de realizar el cálculo de la socavación general. Sin embargo, los métodos de Maza y de Lischtvan–Lebediev, dan resultados similares, por lo que la recomendación sería



emplear el de Maza, pues fue desarrollado para ríos de México y es ampliamente reconocido en México y latino américa.

- Se sugiere que para futuras investigaciones y verificación de estos métodos, se realicen programas de trabajos para el monitoreo del fondo, utilizando equipos instrumentados, modelos hidrodinámicos o bien batimetrías del fondo una vez terminando los periodos de tormentas. Lo anterior, con el único fin, de verificar y comparar que tan reales son los resultados de socavación arrojados por los métodos empíricos presentados en este trabajo.

A continuación se presentan algunas recomendaciones:

Para comprender el comportamiento de la socavación, es de gran utilidad tener conocimiento sobre el movimiento de partículas sólidas en el fondo de un cauce.

Se recomienda ampliamente, medir la distribución de la velocidades en la sección transversal preferentemente con equipo acústico Doppler o ADCP, que permitan obtener las velocidades puntuales en cada sección, lo que se espera tendría mejoras en la estimación de la socavación, pues cuando se emplean los valores de velocidad promedios, se puede subestimar o sobre estimar la socavación.



CAPÍTULO VI. REFERENCIAS

Aguado Sandoval, A. (2012). *Estimación de la socavación en puentes para su uso en el cálculo del riesgo físico*. Tesis de licenciatura no publicada, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Aldana, J., Ordóñez, J.I. (2003). *Comparación de fórmulas para calcular la socavación general en cauces aluviales: Primer simposio regional sobre hidráulica de ríos; Universidad Nacional de Colombia–Bogotá*. Recuperado de http://irh-fce.unse.edu.ar/Rios2003/RE/RE_2_1.pdf, [05-09-2017].

Barbosa Gil, S. (2013). *Metodología para calcular la profundidad de socavación general en ríos de montaña (Fondo de grava)*. Tesis de licenciatura no publicada, Facultad de minas, Escuela de geociencias y medio ambiente, Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.

Campa Rodríguez, A., Astorga Bustillos, F.R. (2015). Métodos para el cálculo de la socavación local en pilas de puentes. *Ingeniería y Tecnología*, 9(1), 36-48.

¹ Corral M., Castello E., Gerbaudo C., Hillman G., Plencovich G., Ambrosino S., Pagot M., Rodríguez A., Martínez R. y Farías H. (2003). *Análisis hidromorfológico y solución ingenieril para el cruce del poliducto Repsol-YPF sobre un tramo del Río Cuarto (Córdoba, Argentina)*. Primer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Bs. As. 2003. Recuperado de http://atl.org.mx/isilac/images/2017/enero/Rios%202003%20Ezeiza/tc/TC_1_5.pdf, [05-09-2017]

Díaz Yáñez, J. C. (2012). *Análisis comparativo de las relaciones funcionales para el cálculo de las profundidades alrededor de obstáculos*. Tesis de licenciatura no publicada,



Facultad de Ingeniería Ciencias Físicas y Matemática, Universidad Central de Ecuador. Quito, Ecuador.

Farias, H.D., Pílan, M.T., Olmos, L.A., Pece, F.J. (2008). *Erosión general en ríos aluviales*. Institutos de Recursos Hídricos. FCE y T-UNSE. Santiago del Estero. Argentina. Vol.15, No.2, p.p. 107, 122.

Farias, H.D., Pílan, M.T., Pece, F.J., Olmos, L.A. (2003). *Erosión general en ríos arenosos*. Instituto de Recursos Hídricos. Santiago del Estero, Argentina. Recuperado de <http://www.academia.edu/2968720/Erosion%20General%20en%20r%C3%ADos%20con%20Lechos%20Arenosos>, [06-09-2017]

Forde, M.C., McCann, D.M., Clark, M.R., Broughton, K.J., Fenning, P.J., Brown, A. (1999). *Radar measurement of bridge scour*. NDT&E International 1999. Vol.32, No.8, p.p. 481-492.

García Flores, M. y Maza Álvarez, J.A. (1996). *Erosión en ríos*. Capítulo 13 del Manual de Ingeniería de Ríos. Instituto de Ingeniería, UNAM. CONAGUA. México.

García Sánchez, J. (2014). *Modelos físicos*. Recuperado de <http://www.iingen.unam.mx/esmx/BancoDeInformacion/MemoriasdeEventos/TransporteDeSedimentos/GraciaModelosFisicos.pdf>, [22-11-2017].

Gicze, (2013). *Construcción de cruce de gasoducto de 36"ø x 1.85 km Paredón-Macayo del río Mezcalapa a base de dragado*. Villahermosa, Tabasco. México.

Han-Chung, Y., Chih-Chiang, S. (2014). *Real-time river bed scour monitoring and synchronous maximum depth data collected during typhoon soulík in 2013*. Hydrological Processes. 29, 1056-1068. doi: 10.1002/hyp.10219



IMT. (2012). *Metodología para la medición de la velocidad de flujo en un río en el diagnóstico de la socavación en pilas de un puente, utilizando un dispositivo electrónico*. Recuperado de <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt356.pdf> [22-11-2017].

Jaramillo Acuña, V.M. (2013). *Estudio de Socavación en el tercer puente sobre el río Acautin en Temuco*. Tesis de licenciatura no publicada, Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Universidad Austral de Chile. Chile

Pérez Luna, C.P. (2012). *Modelación numérica de la hidrodinámica de la erosión en pilas de puentes con esviaje empleando la dinámica de fluidos computacional CFD*. Tesis de licenciatura no publicada, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

Prendergast, L.J., Gavin, K. (2014). A review of bridge scour monitoring techniques. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 6, 138-149.

Rincón, J., León J., Graterol J. (2015). Comparative analysis of the HEC-RAS and BRI-STARS models in the hydraulic evaluation of bridges considering the fixed bed. 3, 41-51.

Maza Álvarez, J.A., Sánchez Bribiesca, J.L. (1964). Contribución al estudio de socavación local en pilas de puentes. *Instituto de Ingeniería UNAM*, 84, 43-55.

Maza Álvarez, J.A., García Flores, M. (1996). Estabilidad de cauces. *Instituto de Ingeniería UNAM*, 12, 1-116.

Molinas A. (1993). Model for Alluvial River Simulation, *ASCE Water resources Eng., Reston, VA*, 1723-1731.



Montejo Morales, F., Guillen Cruz, O., Huerta Amaya, T.J. (2014). Análisis morfológico por efecto de una obra de protección marginal. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica, Puerto Vallarta, Jalisco, México. p.p. 1-7

Nalluri, Ch., Saldarriaga, J.G., Plata, F. (1999). Revisión de ecuaciones que predicen la socavación local alrededor de pilas de puente. *Revista de ingeniería, Universidad de los Andes*, (9), 52-60. doi: 10.16924/riua.v0i9.598

Palmer, R., Turkiyyah, G., Harmsen, P. (1999). *CAESAR: An Expert System for Evaluation of Scour and Stream Stability*. Seattle, WA: National Academy Press.

Richardson, E.V. (1999). *History of bridge scour research and evaluations in the United States, Stream stability and scour at highway bridges*. ASCE. pp. 15-40.

Richardson, E.V., Lagasse P.F. (1999). *Introduction to evaluating scour at bridges, Stream stability and scour at highway bridges*. ASCE. , Reston, Virginia, pp. 1-11.

Santiago Casanova, M.E. (2007). *Socavación de ríos puentes y carreteras*. Tesis de licenciatura no publicada, Instituto Politécnico Nacional. México, D.F.

Schreider, M., Scacchi, G., Reynares, M., Franco, F. (2002). Aplicación del método de Lischtvan-Lebediev al cálculo de erosión general en escurrimientos con lechos de arena. *Ingeniería hidráulica en México*, Vol. XVI, Num. 1, 15-26.

S.C.T., (2014). *Guía para la atención de emergencias en carreteras y puentes*. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/26325/GEC_0114.pdf. [06-09-2017]

Suarez Díaz, J. (2008). *Calculo de socavación. Control de Erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia: CDMB.



Tlatempa Dionisio, X., García Eugenio, E., Bello Marin, J.V. (2014). Análisis hidráulico del río Santa Catarina para la construcción del vía ducto al margen del cauce. *XIII Congreso Nacional de Hidráulica*, Puerto Vallarta Jalisco, México. p.p. 1-8.

U.S. Army Corp of Engineers, (1993). Scour and Deposition in Rivers and Reservoirs, User's Manual, HEC-6, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA. Recuperado de [http://www.hec.usace.army.mil/publications/ComputerProgramDocumentation/HEC-6_UsersManual_\(CPD-6\).pdf](http://www.hec.usace.army.mil/publications/ComputerProgramDocumentation/HEC-6_UsersManual_(CPD-6).pdf). [06-09-2017]

Vide Juan, P.M. (2003). *Ingeniería de ríos*. Barcelona, España: Alfaomega

Zetina Domínguez, G., Marengo Mogollón, H., Cortes Cortes, C., Aguirre Tello, S. (2012). Socavación en el cauce, y sus implicaciones en la obra de generación. *XXII Congreso Nacional de Hidráulica*, Acapulco Guerrero, México. p.p. 1-7.



Estimación de la Socavación General: Análisis comparativo

INFORME DE ORIGINALIDAD

6%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	irh-fce.unse.edu.ar Internet	351 palabras — 2%
2	vdocumento.com Internet	169 palabras — 1%
3	vsip.info Internet	143 palabras — 1%
4	www.scribd.com Internet	73 palabras — < 1%
5	esdocs.com Internet	62 palabras — < 1%
6	www.ptolomeo.unam.mx:8080 Internet	62 palabras — < 1%
7	es.wikipedia.org Internet	42 palabras — < 1%
8	es.scribd.com Internet	37 palabras — < 1%
9	idoc.pub Internet	23 palabras — < 1%
10	fdocuments.mx Internet	

19 palabras — < 1%

11 opac.fmoues.edu.sv
Internet

19 palabras — < 1%

12 bibdigital.epn.edu.ec
Internet

15 palabras — < 1%

13 repositorio.lamolina.edu.pe
Internet

15 palabras — < 1%

14 repositorio.upao.edu.pe
Internet

15 palabras — < 1%

EXCLUIR CITAS

ACTIVADO

EXCLUIR FUENTES

DESACTIVADO

EXCLUIR BIBLIOGRAFÍA

ACTIVADO

EXCLUIR COINCIDENCIAS < 15 PALABRAS