

Análisis de la Socavación en Cauces Naturales

Toapaxi J.*; Galiano L.*; Castro M.**; Hidalgo X. **; Valencia N.**

*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador

e-mail: jorge_toapaxi@hotmail.com; lesly.galiano@gmail.com

**Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos (CIERHI), Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador; e-mail: marco.castro; ximena.hidalgo; nathalia.valencia@epn.edu.ec

Resumen: La morfología de un cauce natural, debido a la ubicación de obras o a la ocurrencia de un evento hidrológico, varía con el fin de mantener su equilibrio. Así, la socavación constituye un fenómeno importante a considerar en el diseño hidráulico y estructural de los elementos de apoyo que conforman un puente. Se distingue dos tipos de socavación: 1) General y 2) Local (estrechamientos, curvas, pilas y estribos), fenómenos en los que influyen factores geomorfológicos, hidrológicos, hidráulicos y sedimentológicos. En el presente artículo se presenta los procedimientos, mediante diagramas de flujo, que permiten el cálculo de los diferentes tipos de socavación y la comparación de los resultados obtenidos con formulaciones recopiladas de varios autores.

Palabras clave: Cauce natural, socavación, socavación general, socavación local.

Abstract: The morphology of a natural channel, due to the location of structures or the occurrence of a hydrological event, varies in order to keep its balance. Thus, scouring is an important phenomenon that has to be considered in the hydraulic and structural design of bridges bearing elements. There are two types of scour: 1) General and 2) Local (contractions, bends, piers and abutments), phenomena which are influenced by geomorphic, hydrologic, hydraulic and sedimentological factors. This article features the procedures, through flowcharts, enabling the calculation of the different types of scour and the comparison of the outcome obtained with the compiled formulations of several authors.

Keywords: Natural riverbed, scour, general scour, local scour.

1. INTRODUCCION

La morfología de un cauce natural puede variar debido a la acción de fenómenos fluviales e hidrológicos (crecidas) y por la intervención humana (implantación de obras).

A lo largo del perfil longitudinal de un cauce se presentan fenómenos naturales que pueden modificar su condición geométrica. En la Fig. 1, se muestra una representación del desarrollo longitudinal de un cauce, generalmente dividido en cuatro tramos: 1) El tramo superior que se caracteriza por ser una región montañosa constituida de rocas y gravas gruesas, predominando la erosión del lecho; 2) El tramo medio, región pedemontañosa constituida por grava y arena, predominando el equilibrio del lecho, es decir, el caudal sólido que entra es igual al caudal sólido que sale; 3) El tramo inferior, planicie constituida por arena gruesa y fina, predominando la sedimentación y 4) La desembocadura o zona de confluencia constituida por limos, arcillas y arena fina, en donde predomina la sedimentación.

El paso de una crecida genera mayor turbulencia e incrementa la capacidad de arrastre en un cauce, provocando un aumento en la cantidad de sedimentos transportados. Cuando el caudal desciende a los niveles normales, el sedimento se deposita en el fondo, reconformando el mismo a su nivel normal, excepto por algunos tramos que se ven

afectados por la disminución del nivel del lecho, originando la socavación. Uno de los mayores problemas ocasionados por una crecida se presenta en los puentes, debido a la socavación alrededor de pilas y estribos, causando en muchos casos el colapso de los mismos.

2. TIPOS DE SOCAVACIÓN

2.1 Socavación General

La socavación general, también conocida como socavación normal, consiste en una disminución generalizada del fondo por el aumento del arrastre de sedimentos debido al incremento de la capacidad de flujo (crecidas). La socavación del fondo se produce debido a un desequilibrio entre el aporte sólido que transporta el agua a una sección y el material removido.

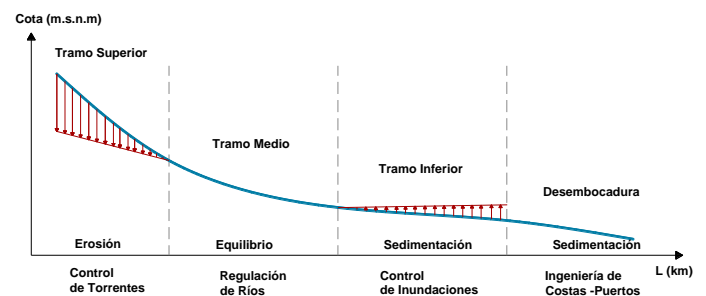


Figura 1. Representación gráfica del desarrollo longitudinal de un cauce natural.

Artículo recibido el 20 de noviembre, 2014; revisado 20 noviembre de 2014.
Esta obra fue auspiciada por el Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos (CIERHI).
Autores para correspondencia: jorge_toapaxi@hotmail.com, lesly.galiano@gmail.com.
Ladrón de Guevara E11-253, Quito.

Este tipo de socavación es consecuencia del régimen del flujo[4], [7]y puede ocurrir con o sin la presencia de una obra en el cauce, en periodos cortos de tiempo en una o varias crecidas o en periodos largos en intervalos del orden de años.

2.2 Socavación Local

La socavación local se produce debido a la presencia de estrechamientos, curvas o estructuras en la corriente de un río, lo que provoca un aumento en la intensidad del flujo capaz de remover el material del lecho. Este tipo de socavación afecta a una zona limitada, caracterizada por una fuerte turbulencia con desarrollo de remolinos y vórtices inducidos por la obstrucción al paso del agua.

En el análisis de la socavación local se puede considerar dos escenarios [1],[3],[8]: socavación en agua clara o socavación en lecho móvil. En la socavación en agua clara no existe transporte de sedimentos del lecho desde aguas arriba y por lo tanto no hay reabastecimiento de sedimentos en el hoyo socavado. Alcanza equilibrio cuando el esfuerzo cortante en el lecho es menor que el requerido para el inicio del movimiento de las partículas. Al contrario, en la socavación en lecho móvil existe transporte de sedimentos del lecho desde aguas arriba y por lo tanto parte de este sedimento queda atrapado en el hoyo de socavación. En este caso la socavación alcanza equilibrio cuando la cantidad de material que es transportado iguala la cantidad de material que es removido.

A continuación se describen las generalidades de la socavación local de acuerdo al tipo de obstrucción que se presente:

- *Socavación Local en Estrechamientos*: Se presenta en los sitios del curso de un río donde exista un estrechamiento más o menos brusco. Por ejemplo, en los cimientos de un puente o en un estrechamiento natural a lo ancho del río.
- *Socavación Local en Curvas*: En las curvas de los cauces, se presenta una mayor velocidad en su parte exterior (parte cóncava), aumentando así, la capacidad de arrastre de sólidos y provocando una mayor profundidad de socavación en esta zona.
- *Socavación Local en Pilas*: El proceso de socavación alrededor de pilas de puentes es rápido, y se produce debido a la existencia de velocidades mayores alrededor de estas estructuras, provocando la formación de vórtices frontales, laterales y de estela detrás de la pila [1], [2], [6], [8], los cuales constituyen la principal causa de este tipo de socavación.

3. PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA SOCAVACIÓN

Los factores que influyen en la socavación general y local, en un río son de origen geomorfológico, hidrológico, hidráulico y sedimentológico[3], [4], [6].

- Entre los principales factores geomorfológicos que influyen en la socavación están: las condiciones de

borde (vegetación y tipo de suelo), alineación en planta, sección transversal (ancho del cauce), ubicación del río y topografía (pendiente longitudinal y pendiente de las laderas). Estos factores influyen en mayor medida en el caso de la socavación general, que en la socavación local.

- Las principales variables hidrológicas son la precipitación, la duración y la frecuencia de la crecida.
- Las variables hidráulicas que influyen en la socavación son: el calado, la viscosidad, tensión tangencial, velocidades (velocidad de caída, velocidad media del flujo y velocidad crítica) y el caudal.
- Las variables sedimentológicas que influyen en la socavación son: tipo de sedimento, tamaño de las partículas y el caudal sólido.

En el caso de la socavación general, las principales variables que influyen en la profundidad de socavación son el caudal (directamente) y el tamaño del material del lecho (inversamente).

En el caso particular de la socavación local, los factores principales que influyen según el tipo de estructura son los siguientes:

- Estrechamientos: El grado de contracción.
- Curvas: El radio de curvatura y el ancho del cauce.
- Según [6] para pilas y estribos: a) intensidad de flujo, b) profundidad del flujo, c) grosor del sedimento, d) no uniformidad del sedimento, e) forma de la cimentación y f) alineación de la cimentación.

4. METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LA SOCAVACIÓN

4.1 Cálculo de la Socavación General

La determinación de la socavación general se basa en fundamentos teóricos y experimentales, es decir, se utilizan formulaciones semiempíricas.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de las formulaciones más utilizadas para el cálculo de la profundidad media de socavación a largo plazo en lechos no cohesivos. Adicionalmente, en la Fig. 2 se presenta el diagrama de flujo para el cálculo de la socavación “ Δs ” (diferencia entre el tirante medio de la sección antes de la socavación y la profundidad media de socavación calculada).

Para suelos heterogéneos (diferentes estratos), con el fin de obtener información más clara del fondo del cauce luego de una avenida extraordinaria, es necesario calcular de la profundidad de socavación en diferentes puntos en la sección transversal del cauce. Los suelos heterogéneos pueden estar compuestos de material cohesivo y no cohesivo.

El método aplicado para este caso es el Método Analítico por Tanteo [5], que consiste en determinar en qué estrato termina la socavación. Así, los cálculos terminan cuando el valor H_s (profundidad de socavación medida desde el nivel libre de agua) calculado para uno de los estratos, está entre las fronteras superior e inferior del mismo. Cuando esto no

sucede en ninguno de los estratos, el valor de H_s será el mayor valor producido en el punto de análisis.

Tabla 1. Ecuaciones para el cálculo de la socavación general a largo plazo en cauces naturales

SOCAVACIÓN GENERAL (A LARGO PLAZO)		
AUTOR	ECUACIÓN	OBSERVACIONES
Lacey (1930)	$h_{ms} = 0,389 \left(\frac{Q^{1/3}}{d_m^{1/6}} \right)$	
Blench (1969)	Para arenas de $0,06\text{mm} < d_{50} < 2\text{mm}$ $h_{ms} = 1,200 \left(\frac{q^{2/3}}{d_{50}^{1/6}} \right)$	Basado en estudios de ríos de grava gruesa
	Para arenas de $d_{50} > 2\text{mm}$ $h_{ms} = 1,230 \left(\frac{q^{2/3}}{d_{50}^{1/12}} \right)$	
Maza & Echavarría (1973)	$h_{ms} = 0,365 \left(\frac{Q^{0,784}}{B^{0,784} d_{50}^{0,157}} \right)$	Basado en alcances de varios autores, incluyendo estudios en Sudamérica d_{50} en (m)
Lischtvan & Levediev (-)	$h_{ms} = 0,333 \left(\frac{q^{0,710}}{d_{50}^{0,199}} \right)$	Válido para el rango de las arenas d_{50} en (m)
Kellerhals (-)	$h_{ms} = 0,470 \left(\frac{q^{0,800}}{d_{90}^{0,120}} \right)$	Válido para lechos de grava d_{90} en (m)

- B:** Ancho de la superficie del agua (m)
- $d_{m, 50, 90}$:** Diámetro medio, diámetro donde el 50% y 90% del material es fino, respectivamente (mm)
- h_{ms} :** Profundidad media de socavación (m)
- Q:** Caudal de diseño (m^3/s)
- q:** Caudal de diseño ($\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$)

En la Tabla 2 se presentan las ecuaciones que se aplican en el Método Analítico de Prueba y Error. Adicionalmente, en la Fig. 3, se presenta el procedimiento para el cálculo del perfil de la socavación general en cauces naturales, según el método antes mencionado.

Tabla 2. Ecuaciones para el cálculo de la socavación general en suelos heterogéneos según el Método Analítico por Tanteo

SOCAVACIÓN GENERAL (SUELOS HETEROGÉNEOS)		
AUTOR	ECUACIÓN	OBSERVACIONES
Maza (1968)	Para estratos cohesivos: $H_s = \left(\frac{\alpha H_0^{5/3}}{0,60 \beta \gamma_s^{1,18}} \right)^{\frac{1}{1+\alpha}}$	$\alpha = \left(\frac{Q}{H_m^{5/3} W_e \mu} \right)$
	Para estratos no cohesivos: $H_s = \left(\frac{\alpha H_0^{5/3}}{0,68 \beta d_m^{0,28}} \right)^{\frac{1}{1+\alpha}}$	

- d_m :** Diámetro medio de las partículas (mm)
- H_0 :** Es la diferencia entre el nivel del fondo antes de la avenida (pto de análisis) y el nivel máximo de agua (m)
- H_m :** Profundidad media de la sección (m)
- H_s :** Profundidad de socavación en el punto de análisis (m)
- Q:** Caudal de diseño (m^3/s)
- W_e :** Ancho efectivo que depende de la dirección de las pilas (m)
- α :** Coeficiente de distribución de gasto
- γ_s :** Peso específico seco del material (t/m^3)
- β :** Coeficiente de paso, depende de la frecuencia de la avenida (-). Ver [5]
- μ :** Factor de contracción. Ver [5]
- $1/(1+\alpha)$:** Depende del tipo de material. Ver [5]

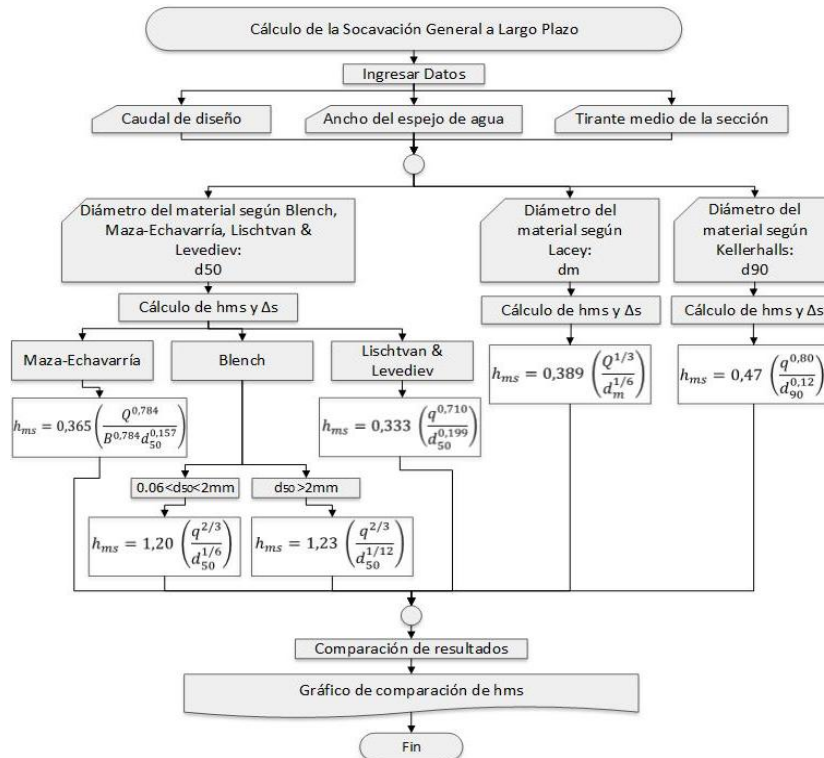


Figura 2. Diagrama de flujo para el cálculo de la socavación general a largo plazo en cauces naturales

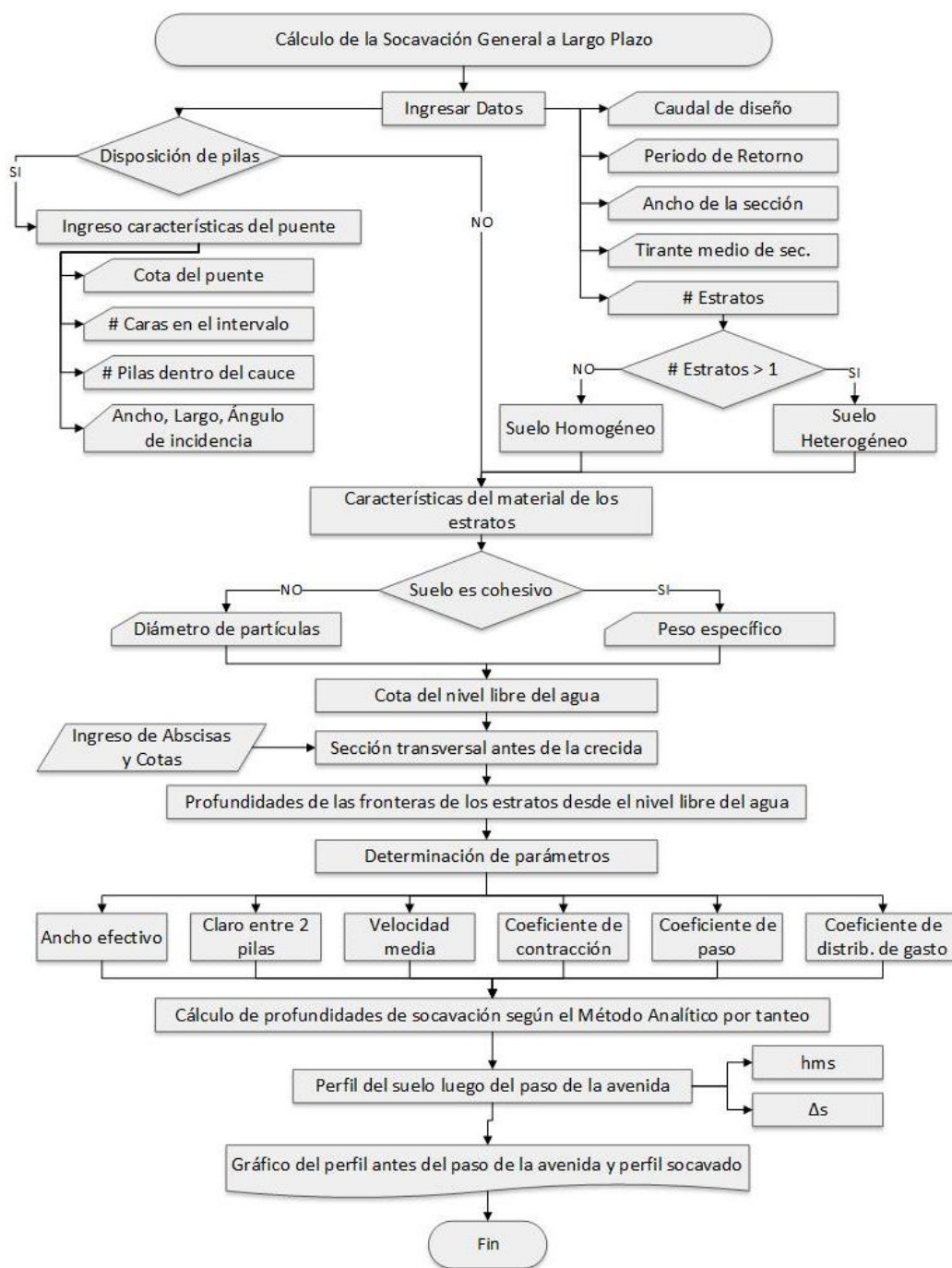


Figura 3. Procedimiento para el cálculo del perfil de socavación general en cauces naturales según Maza.

4.2 Cálculo de la Socavación Local

- Entre las formulaciones para la determinación de la profundidad de socavación en estrechamientos se tiene las siguientes: Laursen (1962, 1963), Parker (1981), Richardson & Davis (1995), HEC-18 [6]. Estas ecuaciones están principalmente en función de los anchos tanto en la aproximación como en la

contracción. En la Tabla 3 se presentan ecuaciones tanto para socavación en lecho móvil como socavación en agua clara. Adicionalmente, en la Fig. 4 se presenta el procedimiento para el cálculo del perfil de la socavación local en estrechamientos utilizando las ecuaciones mencionadas anteriormente.

Tabla 3. Ecuaciones recomendadas para el cálculo de la socavación local en estrechamientos

SOCAVACIÓN LOCAL EN ESTRECHAMIENTOS		
AUTOR	ECUACIÓN	OBSERVACIONES
Laursen (1958, 1960, 1962, 1963)	$\frac{y_2}{y_1} = \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{k_1}$	Socavación en Lecho Móvil $Q_2=Q_{1m}$ (contracción cercana al canal principal) $n_1=n_2$ (Coeficiente de rugosidad de Manning) $k_1 = 0,59$ para $u^*/w < 0,5$ $k_1 = 0,64$ para $0,5 < u^*/w < 2$ $k_1 = 0,69$ para $u^*/w > 2$
	$\frac{y_2}{y_1} = \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{6/7} \left(\frac{V_1^2}{36 y_1^{1/3} d_{50}^{2/3}}\right)^{3/7}$	Socavación en Agua Clara Unidades en S.I.
Parker (1985)	$\frac{y_2}{y_1} = \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{k_4}$	Socavación en Lecho Móvil Cauces de grava, no considera el acorazamiento (conservadora) k_4 varía entre 0,675 a 0,825
Richardson & Davis (1995)	$\frac{y_2}{y_1} = \left(\frac{Q_1}{Q_{1m}}\right)^{6/7} \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{k_1}$	Socavación en Lecho Móvil basada en estudios anteriores incluyendo la ecuación de Laursen (1960)
Richardson & Davis (1995)/ HEC-18	$y_2 = 1,48 \left(\frac{Q_2}{d_m^{1/3} W_2}\right)^{6/7}$	Socavación en Agua Clara

- d_{m, 50}:** Tamaño medio del sedimento (mm)
- k₁:** Coeficiente que depende del radio de velocidad de corte (u*) y la velocidad de caída de las partículas (w)
- Q_{1m}:** Caudal aguas arriba que transporta sedimentos, generalmente en el cauce principal(m³/s)
- Q₂:** Caudal en la zona contraída (m³/s)
- V₁:** Velocidad del flujo de aproximación (m/s)
- W₁:** Ancho del cauce principal de aproximación (m)
- W₂:** Ancho del cauce principal en la sección contraída (m)
- y₁:** Calado de aproximación a la contracción (m)
- y₂:** Calado en la contracción (m)

- Las formulaciones para el cálculo de la socavación en curvas están en función del radio de curvatura, el ancho del cauce y de la profundidad media de la sección transversal, entre éstas se tiene: Altunin (-), Galay (1987), Apmann (1972), Thorne (1988), Maynord (1996), Maynord Modificado (1996) y Lebediev (-). Las ecuaciones mencionadas se presentan en la Tabla 4, y el procedimiento para el cálculo de socavación local en curvas se presenta en la Fig. 5.
- En el caso de la socavación local en pilas, todas las formulaciones toman en cuenta la relación ancho de la pila respecto al calado, entre las cuales algunas consideran parámetros adimensionales que toman en cuenta: el sedimento, la alineación de las pilas, su forma, entre otros. Entre algunas de las formulaciones que presenta [1], [6], y [8] se tiene: Breusers et al. (1977), Jain & Fischer (1980), Melville & Sutherland (1988), Breusers & Raudkivi (1991), Gao et al. (1993),

Richardson & Davis (1995) y Melville (1997). En la Tabla 5 se muestra estas ecuaciones con sus respectivas observaciones. En la Fig. 6 se presenta el procedimiento para el cálculo de socavación local en pilas con las formulaciones mencionadas.

- Para estribos, las formulaciones son muy similares a las ecuaciones para pilas, con la diferencia que éstas relacionan el largo del estribo con el calado. Con el fin de mencionar algunas de las formulaciones presentadas en [6] para el cálculo de este tipo de socavación, se tiene: Liu et al (1961), Laursen (1962,1963), Forchlich (1989a), Melville (1992,1997) y Richardson & Davis (1995). En la Tabla 6 se presentalas ecuaciones mencionadas y en la Fig. 7, el respectivo procedimiento para el cálculo de socavación local en estribos.

Tabla 4. Ecuación recomendada para el cálculo de la socavación local en curvas

SOCAVACIÓN LOCAL EN CURVAS		
AUTOR	ECUACIÓN	OBSERVACIONES
Apmann (1972)	$\frac{y_{bs}}{y_u} = 1,00 - 2,00 \frac{W}{R_o}$	En base a la expresión de Chatley (1931)
Galay (1987)	$\frac{y_{bs}}{y_u} = 0,90 - 3,70 \frac{W}{R_c}$	Para curvas de 100°
Thorne (1988)	$\frac{y_{bs}}{y_u} = 2,07 - 0,19 \ln \left(\frac{R_c}{W} - 1\right)$	Válido para $R_c/W > 2$
Lebediev (-)	$y_{bs} = y_{m\acute{a}x} \left(1 + \tau \sqrt{W/R_c}\right)$	Considera el calado máximo que se presenta en la crecida
Altunin (-)	$y_{bs} = y_u^\epsilon$	Válida cuando no hay estrechamiento en el cauce
Maynord (1996)	$\frac{y_{bs}}{y_u} = 2,57 - 0,36 \ln \left(\frac{R_c}{W}\right)$	
Maynord modificado (1996)	$\frac{y_{bs}}{y_u} = 1,80 - 0,0510 \frac{R_c}{W} + 0,0084 \frac{W}{y_u}$ Para $1,5 < R_c/W < 10$ y $20 < W/y_u < 125$ Si $R_c/W < 1,5$: $R_c/W = 1,5$ y si $W/y_u < 20$: $W/y_u = 20$ Válida para cauces meándricos formados naturalmente, tanto con lecho de grava y arena	

- R_c:** Radio de curvatura en el eje central del cauce (m)
- R_o:** Radio de curvatura exterior del cauce (m)
- V₁:** Velocidad del flujo de aproximación (m/s)
- ε, τ:** Coeficientes en función de W/Rc (-). Ver [5]
- W:** Ancho del cauce (m)
- y_{bs}:** Máxima profundidad de la curva (m)
- y_{máx}:** Profundidad máxima en el cauce aguas arriba durante la crecida (m)
- y_u:** Profundidad promedio en el cauce aguas arriba de la curva (m)

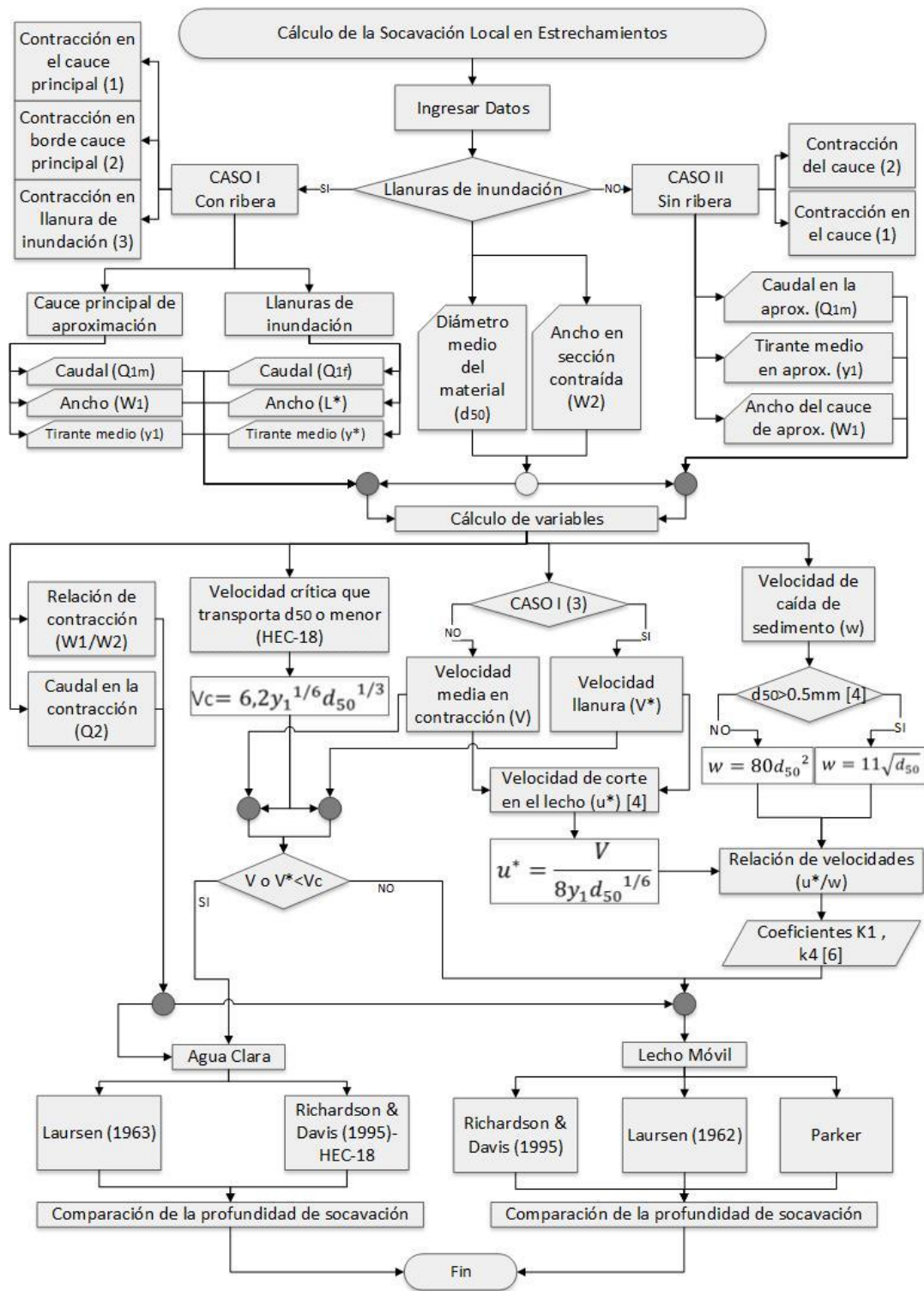


Figura 4. Diagrama de flujo para el cálculo de la socavación local en estrechamientos

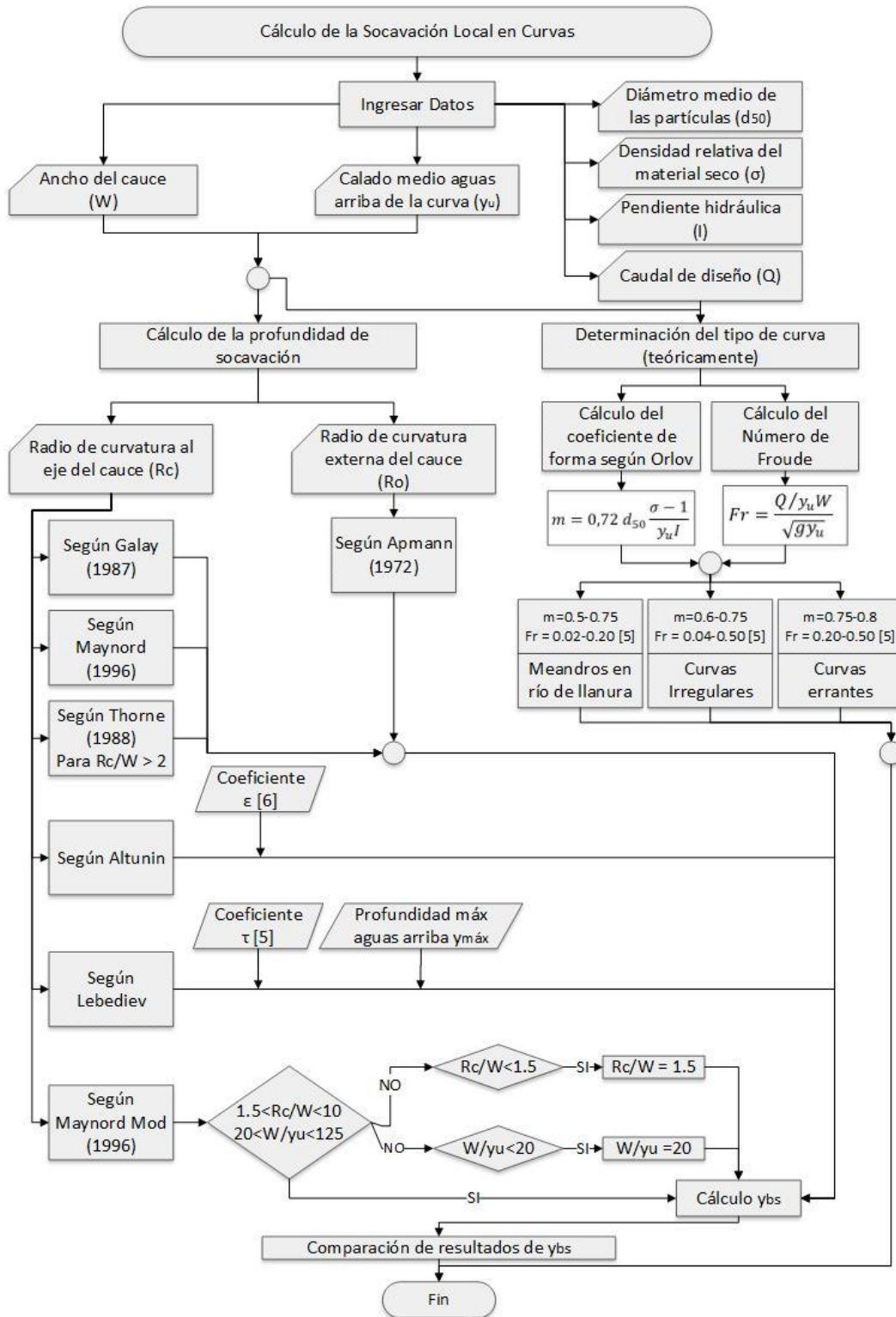


Figura 5. Diagrama de flujo para el cálculo de la socavación local en curvas

Tabla 5. Ecuaciones recomendadas para el cálculo de la socavación local alrededor de pilas de puentes

SOCAVACIÓN LOCAL EN PILAS		
AUTOR	ECUACIÓN	OBSERVACIONES
<i>Breusers et al. (1977)</i>	$\frac{d_s}{b} = 2,00 \tanh\left(\frac{y}{b}\right) K_s K_\theta$	Ecuación dada para las condiciones de inicio del movimiento
<i>Jain & Fischer (1980)</i>	$\frac{d_s}{b} = 1,86 \left(\frac{y}{b}\right)^{0,50}$	Ecuación dada para las condiciones de inicio del movimiento
<i>Melville & Sutherland (1988)</i>	$\frac{d_s}{b} = 2,40 K_y K_s K_d K_\theta$	Para una pila alineada: $d_{s\max} = 2,4 K_s K_d b$ Ecuación dada para las condiciones de inicio del movimiento
<i>Breusers & Raudkivi (1991)</i>	$\frac{d_s}{b} = 2,30 K_y K_s K_d K_\sigma K_\theta$	Para una pila alineada: $d_{s\max} = 2,3 K_\sigma K_s K_d b$
<i>Gao et al. (1993)</i>	$\frac{d_s}{b} = 0,46 K_s K_\theta \left(\frac{y}{b}\right)^{0,40} \left(\frac{y}{d}\right)^{0,07} y^{-0,32}$	Ecuación dada para las condiciones de inicio del movimiento
<i>Richardson & Davis (1995)</i>	$\frac{d_s}{b} = 2,00 K_s K_3 K_4 K_\theta \left(\frac{y}{b}\right)^{0,35} Fr^{0,43}$	$d_{s\max} = 2,4b \quad Fr \leq 0,8$ $d_{s\max} = 3b \quad Fr > 0,8$
<i>Melville (1997)</i>	$d_s = K_{yb} K_s K_d K_l K_\theta$	$K_{yb} = 2,4b \quad b/y < 0,7$ $K_{yb} = 2,4(yb)^{0,5} \quad 0,7 < b/y < 5$ $K_{yb} = 2,4b \quad b/y > 5$ Ecuación dada para las condiciones de inicio del movimiento

- b:** Ancho de la pila (m)
- d:** Tamaño del sedimento (m)
- d_s:** Profundidad de socavación (m)
- Fr:** Número de Froude (-).
- K_d:** Factor de tamaño del sedimento (-).Ver [1], [6]
- K_l:** Factor de intensidad de flujo (-).Ver [6]
- K_s:** Factor de forma de la sedimentación (-).Ver [1], [6]
- K_y:** Factor de profundidad de flujo (-).Ver [1]
- K_{yb}:** Factor en función del calado y el tamaño del cimientto (m)
- K_θ:** Factor de alineación de la cimentación (-).Ver [1], [6]
- K_σ:** Factor de no uniformidad del material (-).Ver [1]
- K₃:** Factor que considera la rugosidad general del cauce (-).Ver [8]
- K₄:** Factor que considera la uniformidad de la gradación (-).Ver [8]
- y:** Tirante medio de la sección (m)

6. CONCLUSIONES

En la socavación general, la intensidad de flujo determina la capacidad de arrastre de las partículas del fondo. Así, a mayor intensidad de flujo, mayor será la socavación, y viceversa. En la práctica, en las ecuaciones para el cálculo de esta socavación se considera importante: el ancho del cauce (factor geomorfológico), el caudal (factor de transporte), y el tamaño característico del sedimento (características del lecho).

A pesar de la existencia de varios modelos matemáticos para el cálculo de la socavación general, estos involucran disponer de una cantidad de información importante, e inversiones significativas en software y entrenamiento de personal, por ello resulta de interés la aplicación de los métodos semiempíricos para la estimación de este fenómeno.

Las fórmulas analizadas para lecho sin cohesión permiten determinar el perfil de socavación cuando se dispone de la distribución lateral de velocidades en la sección. Si no se

dispone de esta información, las formulaciones también son válidas para calcular una profundidad media máxima de socavación general.

Los métodos para la determinación de la socavación general tienen como factor común una formulación generalizada, que varía en sus coeficientes debido a los fundamentos con los que fueron originados. Por lo tanto, las fórmulas para la determinación de la profundidad de la socavación, deben ser aplicadas en función de los rangos de utilidad de cada una de ellas, en cada caso en particular. Por ejemplo, la fórmula de Kellerhals da buenos resultados de cálculo de la profundidad de socavación general en lechos de grava, ya que su formulación fue obtenida en base a datos de ríos de esta característica.

Tabla 6. Ecuaciones recomendadas para el cálculo de la socavación local en estribos

SOCAVACIÓN LOCAL EN ESTRIBOS		
AUTOR	ECUACIÓN	OBSERVACIONES
<i>Liu et al. (1961)</i>	$\frac{d_s}{L} = 1,10 \left(\frac{y}{L}\right)^{0,6} Fr^{0,33}$	Aplicable para lecho móvil en estribos en contrafuerte a lo largo del río.
	$\frac{d_s}{L} = 2,15 \left(\frac{y}{L}\right)^{0,6} Fr^{0,33}$	Aplicable para lecho móvil en estribos en pared vertical y estribos con aleta.
<i>Laursen (1962)</i>	$\frac{d_s}{L} \approx 1,57 \left(\frac{y}{L}\right)^{0,5}$	Se aplica en lecho móvil en un estribo situado en el cauce principal.
<i>Laursen (1963)</i>	$\frac{d_s}{L} \approx 1,89 \left(\frac{y}{L}\right)^{0,5}$	Válido en condiciones de umbral del movimiento. Se aplica para agua clara en un estribo situado en el cauce principal.
<i>Frochlich (1989a)/ HEC-18</i>	$\frac{d_s}{L} = 2,27 K_s K_\theta \left(\frac{y_a}{L}\right)^{0,57} Fr^{0,61}$ $Fr = Vc/(g ya)^{0,5}; Vc = Qc/Ac$ $Qc = \text{Caudal obstruido por el estribo y terraplén}; Ac = \text{Área mojada correspondiente a } Qc$	Para lecho móvil o agua clara:
<i>Melville. (1992)</i>	$\frac{d_s}{L} = K_y K_s K_d K_G K_\theta K_l$	$d_{s\max} = 2L \quad L/y < 1$ $d_{s\max} = 2(yL)^{0,5} \quad 1 < L/y < 25$ $d_{s\max} = 10y \quad L/y > 25$
<i>Richardson & Davis (1995)</i>	$\frac{d_s}{L} = 7,27 K_s K_\theta \left(\frac{y_a}{L}\right) Fr^{0,33}$	Aplicable para $L/y > 25$
<i>Melville (1997)</i>	$d_s = K_{yL} K_s K_d K_l K_\theta K_G$	En condiciones de umbral de movimiento, para agua clara o lecho móvil $K_{yL} = 2L \quad L/y < 1$ $K_{yL} = 2(yL)^{0,5} \quad 1 < L/y < 25$ $K_{yL} = 10y \quad L/y > 25$

- d_s:** Profundidad de socavación (m)
- Fr:** Número de Froude (-).
- K_d:** Factor de tamaño del sedimento (-).Ver [6]
- K_l:** Factor de intensidad de flujo (-).Ver [6]
- K_s:** Factor de forma del estribo (-).Ver [6]
- K_{yL}:** Factor en función del calado y la longitud del estribo (m)
- K_θ:** Factor de alineación de la cimentación (-).Ver [6]
- K_G:** Factor de la geometría del canal de aproximación (-).Ver [6]
- L:** Longitud del estribo (m)
- y:** Tirante medio de la sección (m)
- y_a:** Profundidad promedio en las llanuras de inundación (m)

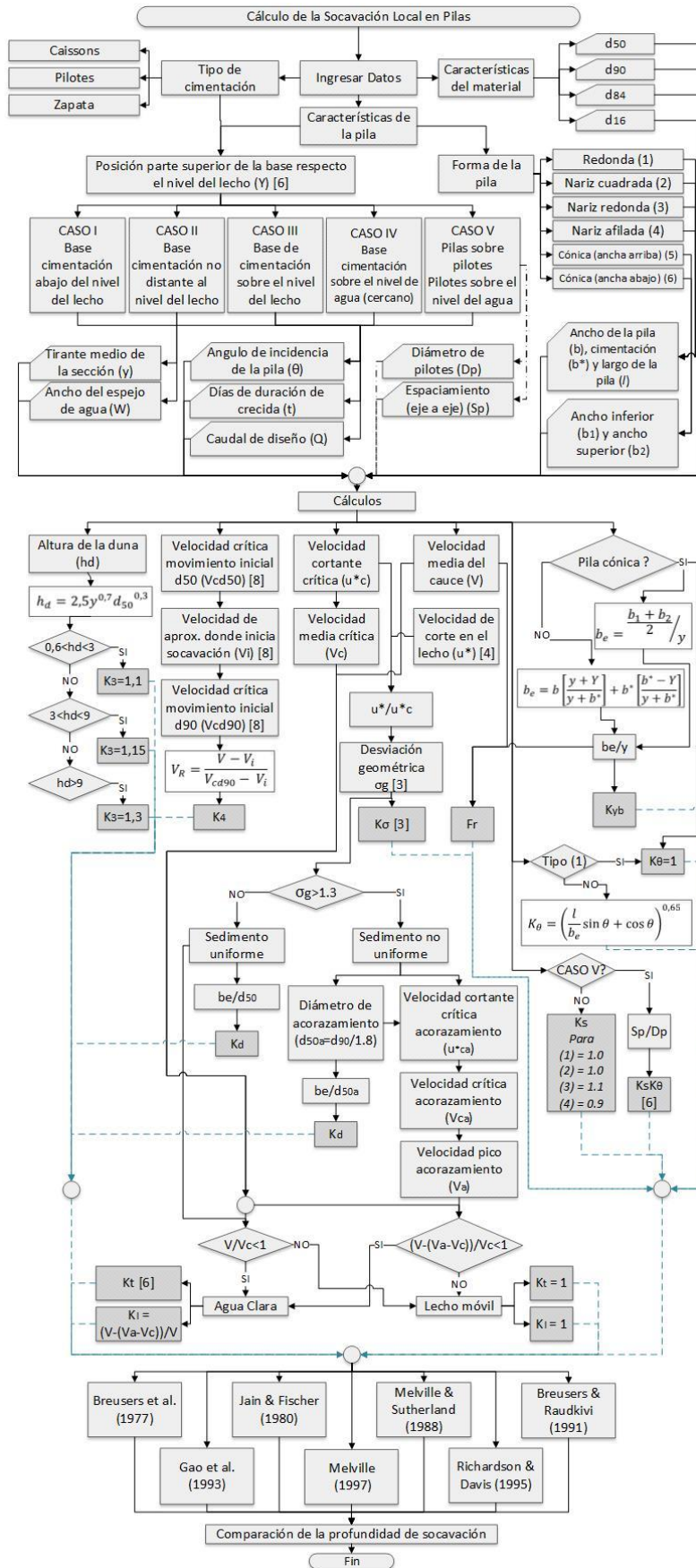


Figura 6. Diagrama de flujo para el cálculo de la socavación local en pilas

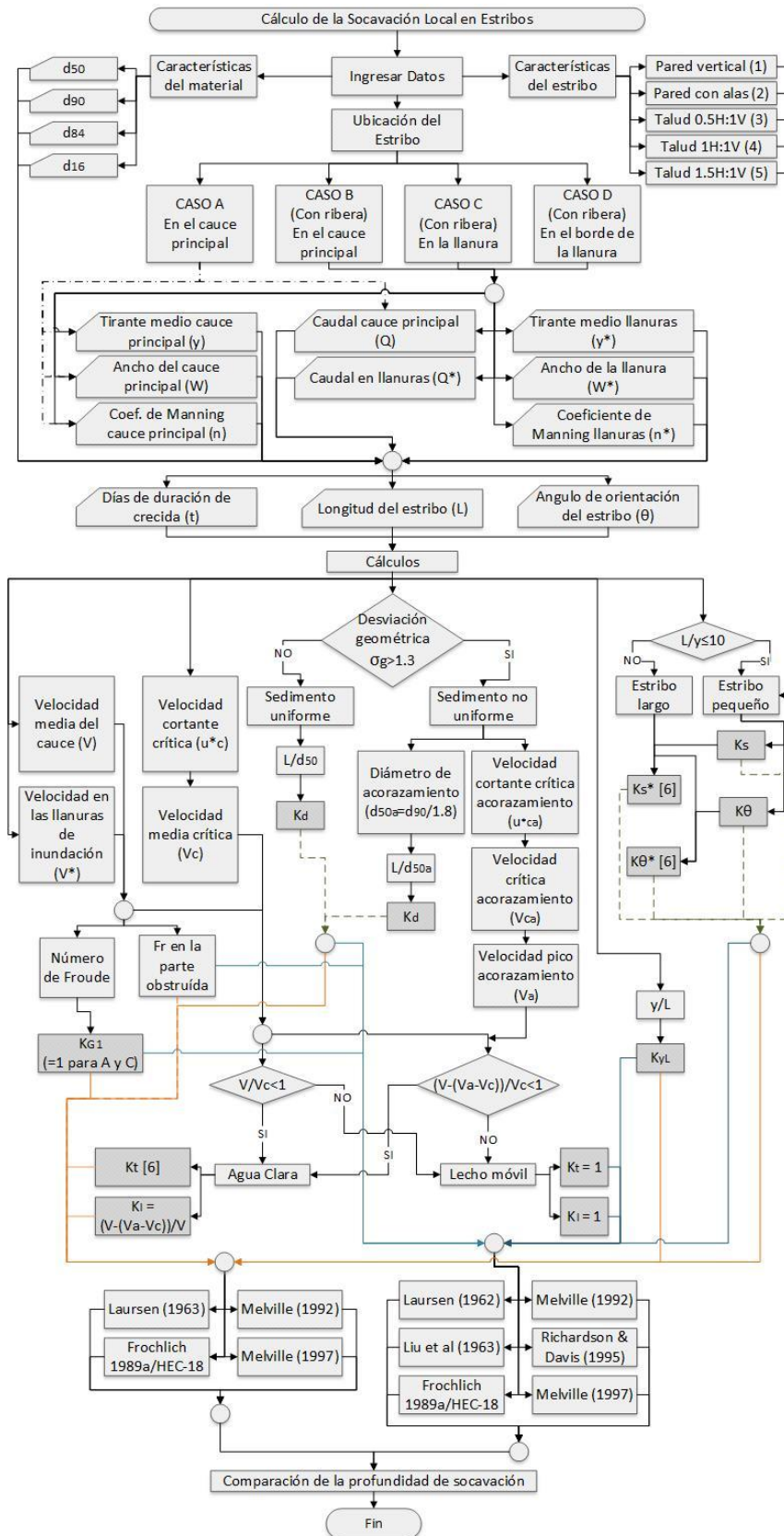


Figura 7. Diagrama de flujo para el cálculo de la socavación local en estribos

La fórmula de Maza para el cálculo de la socavación general en suelos heterogéneos, permite obtener el perfil socavado sin disponer de la distribución transversal de velocidades en la sección. Otras fórmulas, como por ejemplo la de Kellerhals para el cálculo de la socavación general a largo plazo, también permiten calcular el perfil socavado, pero se requiere indispensablemente disponer de la información de velocidades para el cálculo del caudal unitario por franjas.

En estrechamientos, si la relación de contracción es pequeña, ≈ 1.1 , la profundidad de socavación por contracción es mínima, mientras que para relaciones mayores de contracción, ≈ 4.0 , esta profundidad se incrementa considerablemente.

En curvas, la socavación es independiente del tipo de curva o de su longitud, tan solo depende del radio de curvatura. Así, a mayor radio de curvatura, menor profundidad de socavación, y viceversa. En pilas, la mayoría de ecuaciones están dadas para condiciones de inicio del movimiento. Cabe señalar que la formulación de Melville (1997), incluye la mayoría de parámetros que pueden afectar a la profundidad de socavación, por lo que permite obtener un resultado más real al no sobreestimar la misma.

En estribos, se recomienda las formulaciones de Frochlich (1989a)/HEC-18 y Melville (1992 y 1997) debido a que son válidas tanto para el cálculo de la socavación en lecho móvil como en agua clara, y al igual que en pilas estas formulaciones no sobreestiman la socavación obteniéndose resultados cercanos a los que se puede presentar en prototipos.

Adicionalmente, como parte de los resultados, se conformó una hoja de cálculo explicativa que recoge el procedimiento presentado en los diagramas de flujo, conglomerando los diferentes criterios expuestos en el artículo referente a la cuantificación de los niveles de socavación, tanto general

como local. Esta herramienta didáctica permitirá analizar y evaluar el fenómeno de socavación con mayor versatilidad.

Cabe señalar que la elección de la profundidad de socavación calculada, no debe basarse solamente en los resultados obtenidos mediante las ecuaciones, sino también del buen criterio, experiencia y conocimiento de las variables involucradas en el problema por parte del ingeniero de diseño.

REFERENCIAS

- [1] H. Breusers y A. Raudkivi, *Scouring*. Estados Unidos: A. A. Balkema, 1991.
- [2] M. Castro, Ingeniería de Puentes, "Diseño Hidráulico de Puentes," Quito: Ministerio de Obras Públicas - Disensa - Nestlé, 2002.
- [3] G. Hoffmans y H. Verheij, *Scour Manual*. Estados Unidos: A. A. Belkema, 1997.
- [4] J. Martín Vide, *Ingeniería de Ríos*. México D.F.: Alfaomega Grupo Editor S.A. de C.V., 2003.
- [5] J. Maza, *Socavación en Cauces Naturales*. México D.F.: Secretaría de Obras Públicas, 1968.
- [6] B. Melville y S. Coleman, *Bridge Scour*. Colorado: Water Resources Publications LLC, 2000.
- [7] J. Ordóñez, "El Régimen de los Ríos Aluviales y sus Implicaciones sobre la Socavación General," de Segundo Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Bogotá, 2005.
- [8] E. Richardson y P. Lagasse, *Stream Stability and Scour at Highway Bridges. Compendium of Papers ASCE Water Resources Engineering Conferences 1991 to 1998*. Virginia: ASCE, 1999.