

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**ESTIMACIÓN DE LA SOCAVACIÓN ALREDEDOR DE CEPAS DE PUENTE EN  
ESCURRIMIENTOS SUPERCRÍTICOS**

**OSCAR LINK L.<sup>1</sup>**  
**VICENTE SAENGER D.<sup>2</sup>**  
**SCARLETT MORAGA<sup>3</sup>**

**RESUMEN**

La socavación alrededor de puentes es una de las causas de colapso de puentes más importantes a nivel mundial. Ha sido estudiada ampliamente para variadas condiciones que representan bien el caso de ríos de llanura, caracterizados por escurrimientos subcríticos ( $Fr < 1$ ). Sin embargo, casi no existen estudios sobre socavación en escurrimientos supercríticos ( $Fr > 1$ ). Las guías de diseño no diferencian entre los regímenes subcrítico, crítico y supercrítico para estimar la socavación local alrededor de cepas. En muchos casos, se recomienda la aplicación de fórmulas de socavación que han sido desarrolladas sobre la base de mediciones de socavación en escurrimiento subcrítico. En este artículo, se presenta un análisis de la performance de todas las ecuaciones de socavación existentes para estimar la socavación medida en 91 ensayos con escurrimiento supercrítico bien documentados en la literatura especializada. Se obtiene un ranking de las ecuaciones existentes de socavación y se entregan recomendaciones para su aplicación en la práctica.

---

<sup>1</sup> Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción - email: [olink@udec.cl](mailto:olink@udec.cl)

<sup>2</sup> Estudiante de Doctorado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción - email: [vsaenger2017@udec.cl](mailto:vsaenger2017@udec.cl)

<sup>3</sup> Estudiante de Magíster en Cs. de Ingeniería c/m en Ing. Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción - email: [smoraga2018@udec.cl](mailto:smoraga2018@udec.cl)

## 1. INTRODUCCIÓN

La socavación alrededor de puentes es una de las causas de colapso de puentes más importantes a nivel mundial. En Chile, probablemente sea junto con los terremotos la primera causa de colapso de puentes.

La socavación local ha sido estudiada ampliamente para variadas condiciones que representan bien el caso de ríos de llanura, caracterizados por escurrimientos subcríticos ( $Fr < 1$ ). Los primeros trabajos se remontan a inicios del siglo XX, con investigaciones de campo realizadas por el ingeniero chileno Domingo Santa María (Santa María 1909, Link & Dey, 2025). Desde ese entonces, se han propuesto más de 40 ecuaciones para estimar la profundidad máxima de socavación local alrededor de una cepa de puente, cuyos resultados pueden variar enormemente para las mismas condiciones, incluso superando un orden de magnitud (Baranwal & Das, 2024).

En Chile, el Manual de Carreteras (MOP, 2002) recomienda aplicar tres ecuaciones para estimar la socavación local: la ecuación propuesta por Breusers et al. (1977), la ecuación de la Colorado State University, CSU propuesta originalmente por Richardson et al. (1975) y la envolvente de datos experimentales, EDE desarrollada por diversos autores en la Universidad de Chile. La selección de una u otra ecuación depende del número de Froude del escurrimiento. Para  $Fr < 0.5$  se recomienda la ecuación de Breusers et al. (1977), para  $0.5 \leq Fr \leq 0.7$  la ecuación CSU (Richardson et al., 1975) y para  $Fr > 0.7$  se recomienda utilizar la EDE.

Una de las ecuaciones ampliamente utilizadas en el mundo, que ha mostrado entregar estimaciones precisas de la socavación local es la propuesta por Sheppard et al. (2014) y que ha sido adoptada en métodos para calcular la evolución temporal de la socavación como los propuestos por Link et al. (2017) y Pizarro et al. (2020).

El escurrimiento supercrítico alrededor de un obstáculo presenta elementos diferentes a los observados en escurrimientos subcríticos. Riviere et al. (2017) propusieron la existencia de dos patrones de flujo, que ocurren dependiendo del número de Froude y del ancho relativo de la cepa respecto a la profundidad de escurrimiento. Los denominaron *detached hydraulic jump* y *wall jet like bow wave*. Martínez et al. (2025) caracterizaron el flujo en ambos casos mediante simulaciones numéricas que resolvieron las ecuaciones de Reynolds con un cierre de turbulencia k-w y un modelo de superficie libre Volume of Fluid, VoF.

En la literatura especializada prácticamente no existen estudios específicos sobre socavación en escurrimientos supercríticos (Link et al., 2019). Jain y Fisher (1980) realizaron ensayos de socavación con velocidades de escurrimiento altas alrededor de cepas hincadas en arena y propusieron una ecuación para estimar la socavación en función de un número de Froude modificado. En dicha fórmula, la socavación aumenta continuamente con el número de Froude. Roux et al. (2022) realizaron ensayos de socavación con transporte generalizado de sedimento para los dos patrones de flujo documentados por Riviere et al. (2017) usando mezclas bien graduadas de arena con grava. Encontraron que la socavación no fue mayor a la socavación calculada con las ecuaciones de Jain y Fisher (1980), CSU (Richardson et al.,

1975), Sheppard et al. (2014), ni la ecuación 65-1 ampliamente utilizada en China (Qi et al., 2016).

En este artículo, se presenta un análisis del desempeño de todas las ecuaciones de socavación existentes para estimar la socavación medida en 91 ensayos con escurrimientos supercríticos bien documentados en la literatura especializada. A continuación, se describen las ecuaciones y datos existentes y los indicadores para evaluar el desempeño de las ecuaciones. Finalmente, se presenta una evaluación de las ecuaciones de socavación existentes y se entregan recomendaciones para su aplicación en la práctica.

## 2. ECUACIONES PARA ESTIMAR LA SOCAVACIÓN LOCAL

La Tabla 1 muestra el autor y las variables independientes de cada ecuación de socavación local que se evaluó en el presente estudio. En los casos en que las ecuaciones de socavación informan un rango de las variables dependientes en que pueden ser aplicadas, su aplicación se restringió en concordancia. En los demás casos, las ecuaciones fueron aplicadas a los casos medidos.

**Tabla 1. Autor y las variables independientes en las ecuaciones de socavación local**

Referencia	Variables independientes	Referencia	Variables independientes
Santa María (1909)	$f = (H, b, V_{crs})$	Jain & Fischer (1980)	$f = (H, b, F_r, d_{50}, d, s, v)$
Inglis (1949)	$f = (H, b, F_r)$	Jain (1981)	$f = (H, b, V_{crs}, g)$
Inglis – Poona I (Inglis, 1949)	$f = (H, b, V)$	Zanke (1982)	$f = (b, V_{crs}, d_{50})$
Inglis – Poona II (Inglis, 1949)	$f = (H, b, V)$	Melville & Sutherland (1988)	$f = (H, b, V, d_{50}, \sigma, \text{forma pila}, \circ)$
Laursen and Toch (1956)	$f = (H, b)$	Johnson & Ayyub (1992)	$f = (H, b, F_r, \sigma)$
Laursen (1960)	$f = (H, b)$	Kothyari et al. (1992b)	$f = (H, b, d_{50})$
Blench (1962)	$f = (H, b)$	Gao et al. (1993)	$f = (H, b, V, d_{50}, V_{crs})$
Blench – Inglis I (1969)	$f = (H, b, V, d_{50})$	Melville (1997)	$f = (H, b, V, d_{50}, \text{forma pila})$
Blench – Inglis II (Blench, 1969)	$f = (H, b)$	Yanmaz (2001)	$f = (H, b, V, g)$
Laursen (1962)	$f = (H, b)$	Sheppard & Miller (2006)	$f = (H, b, V, V_{crs}, d_{50}, \text{forma pila})$
Laursen (1963)	$f = (H, b)$	Lee & Sturm (2009)	$f = (b, d_{50})$
Larras (1963)	$f = (b)$	Guo (2012)	$f = (H, b, V, d_{50}, \sigma, \rho)$
Breusers (1965)	$f = (b)$	Sheppard et al. (2014)	$f = (H, b, V, V_{crs}, d_{50}, \text{pier shape}, g)$
Shen (1966)	$f = (b, F_r)$	Ettmer et al. (2015)	$f = (b, V, V_{crs})$
Arunachalam (1967)	$f = (H, b)$	Equation 65-1. Qi et al. (2016)	$f = (H, b, V, d_{50}, \text{forma pila}, \circ)$
Coleman (1971)	$f = (H, b, V, g)$	Equation 65-2. Qi et al. (2016)	$f = (H, b, V, d_{50}, \text{forma pila}, \circ, g)$
Hancu (1971)	$f = (H, b, d_{50})$	Sharafi et al. (2016)	$f = (H, b, V, d_{50}, \sigma, g)$
Neill (1973)	$f = (b, \text{forma pila})$	Pandey et al. (2018)	$f = (H, b, V, d_{50}, s, g)$
Basak et al. (1975)	$f = (b)$	Franzetti et al. (2022)	$f = (H, b, V, V_{crs})$
CSU (Richardson et al. 1975)	$f = (H, b, F_r)$	Nandi & Das (2023)	$f = (H, b, V, V_{crs})$
Breusers et al. (1977)	$f = (H, b, V, d_{50}, g, s)$	MdeC (MOP, 2002)	$f = (H, b, F_r, \text{forma pila}, \circ)$

donde  $b$  es el diámetro de la cepa (m),  $H$  es la profundidad de escurrimiento (m),  $V$  es la velocidad de escurrimiento (m/s), y  $d_{50}$  es el tamaño de al menos el 50% del sedimento (mm),  $\nu$  es la viscosidad cinemática del agua ( $m^2/s$ ),  $\sigma$  es la desviación estándar geométrica del tamaño de los sedimentos,  $V_{crs}$  es la velocidad crítica de Hjulström,  $F_r$  es el número de Froude (-),  $g$  es la aceleración de gravedad ( $= 9.81 m/s^2$ ) y  $s$  es la gravedad específica.

### 3. MEDICIONES DE LA PROFUNDIDAD MÁXIMA DE SOCAVACIÓN LOCAL

La Tabla 2 muestra el rango de las variables independientes para cada set de datos disponible en la literatura con escurrimiento supercrítico.

**Tabla 2. Rango de las variables independientes para cada set de datos**

Reference	Nº de datos	$V$ (m/s)	$H$ (m)	$d_{50}$ (mm)	$\sigma$	$V_{crs}$	$b$ (m)	$Z_{eq}$ (m)	$F_r$	$V/V_{crs}$	$H/b$	$b/d_{50}$	$Z_{eq}/b$
Shen et al. (1966)	1	1.08 - 1.08	0.12 - 0.12	0.24 - 0.24	1.0 - 1.0	0.20 - 0.20	0.15 - 0.15	0.16 - 0.16	1.02 - 1.02	5.40 - 5.40	0.77 - 0.77	625.0 - 625.0	1.06 - 1.06
White (1975)	1	1.2 - 1.2	0.1 - 0.1	0.9 - 0.9	1.0 - 1.0	0.25 - 0.25	0.08 - 0.08	0.1 - 0.1	1.21 - 1.21	4.80 - 4.80	1.25 - 1.25	88.89 - 88.89	1.25 - 1.25
Jain & Fischer (1979)	1	1.2 - 1.2	0.1 - 0.1	0.25 - 0.25	1.0 - 1.0	0.20 - 0.20	0.1 - 0.1	0.18 - 0.18	1.2 - 1.2	5.00 - 6.00	1.0 - 1.0	406.4 - 406.4	1.82 - 1.82
Jain & Fischer (1980)	7	1.2 - 1.5	0.1 - 0.1	0.25 - 2.5	1.25 - 1.34	0.20 - 0.40	0.05 - 0.1	0.11 - 0.18	1.2 - 1.5	6.00 - 3.75	1.0 - 2.01	20.32 - 406.4	1.56 - 3.09
Chee (1982)	17	1.05 - 1.4	0.1 - 0.12	0.24 - 1.4	1.22 - 1.3	0.20 - 0.30	0.05 - 0.1	0.08 - 0.14	1.03 - 1.41	5.25 - 4.66	0.98 - 2.28	36.29 - 423.33	1.15 - 1.88
Zanke (1982)	1	2.2 - 2.2	0.42 - 0.42	0.24 - 0.24	1.45 - 1.45	0.20 - 0.20	0.09 - 0.09	0.27 - 0.27	1.08 - 1.08	11.00 - 11.00	4.67 - 4.67	375.0 - 375.0	3.0 - 3.0
Chiew (1984)	29	1.29 - 1.84	0.17 - 0.34	0.24 - 1.45	1.18 - 5.5	0.20 - 0.30	0.03 - 0.05	0.04 - 0.1	1.0 - 1.41	6.45 - 6.13	3.35 - 7.56	21.9 - 166.67	1.2 - 2.46
Melville (1984)	18	1.0 - 1.2	0.1 - 0.1	0.24 - 1.4	1.0 - 1.0	0.20 - 0.30	0.05 - 0.1	0.11 - 0.19	1.01 - 1.21	5.00 - 4.00	0.98 - 1.97	56.79 - 423.33	1.4 - 2.3
Kothyari et al. (1992)	1	5.13 - 5.13	2.53 - 2.53	0.72 - 0.72	1.0 - 1.0	0.22 - 0.22	4.88 - 4.88	6.02 - 6.02	1.03 - 1.03	23.32 - 23.32	0.52 - 0.52	6777.78 - 6777.78	1.23 - 1.23
Mignot et al. (2016)	1	0.63 - 0.63	0.01 - 0.01	1.5 - 1.5	1.06 - 1.06	0.30 - 0.30	0.1 - 0.1	0.09 - 0.09	2.08 - 2.08	2.10 - 2.10	0.1 - 0.1	65.33 - 65.33	0.92 - 0.92
Roux et al. (2022)	6	1.06 - 1.88	0.05 - 0.12	7.0 - 7.0	4.5 - 4.5	0.80 - 0.80	0.06 - 0.14	0.08 - 0.17	1.54 - 1.8	1.33 - 2.35	0.48 - 1.78	8.57 - 20.0	0.79 - 1.47
Bascuñán (2024)	8	0.66 - 0.78	0.02 - 0.02	7.51 - 7.51	1.33 - 1.33	0.90 - 0.90	0.04 - 0.04	0.02 - 0.02	1.58 - 2.03	0.73 - 0.86	0.38 - 0.45	5.33 - 5.33	0.45 - 0.59
Total de datos	91	0.63 - 5.13	0.01 - 2.53	0.24 - 7.51	1.0 - 5.5	0.20 - 0.90	0.03 - 4.88	0.02 - 6.02	1.0 - 2.08	0.73 - 23.32	0.1 - 7.56	5.33 - 6777.78	0.45 - 3.09

### 4. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LAS ECUACIONES

El desempeño de las ecuaciones de socavación se evaluó mediante el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el error absoluto medio (MAE), el error cuadrático medio (RMSE) y el error porcentual medio (MAPE). Las cuatro métricas se definen de la siguiente forma:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (C_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_i - O_i)^2} \quad (3)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|O_i - C_i|}{O_i} \cdot 100\% \quad (4)$$

donde  $C_i$  y  $O_i$  corresponden a la profundidad normalizada de socavación calculada y observada,  $\bar{O}$  es la profundidad normalizada de socavación promedio y  $n$  es el número de observaciones.

## 5. RESULTADOS

La Tabla 3 muestra el desempeño de las distintas ecuaciones de socavación al aplicarlas al set de 91 datos.

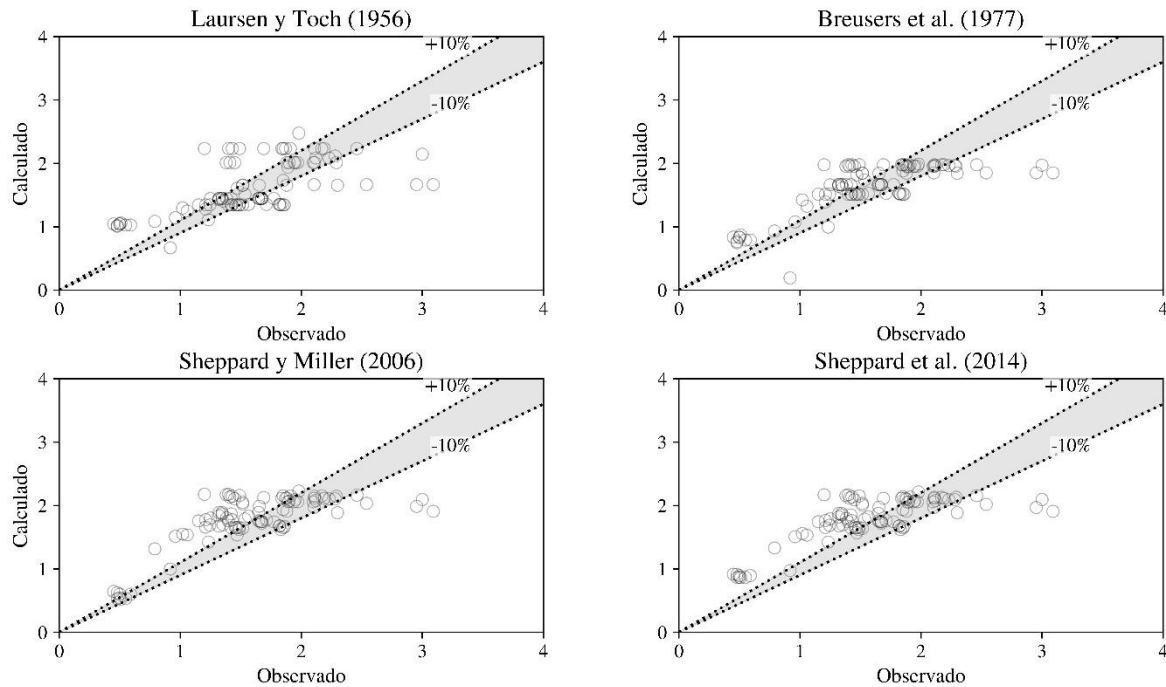
**Tabla 3. Desempeño de las ecuaciones de socavación local**

Ecuación	R <sup>2</sup>	MAE	RMSE	MAPE (%)	> +10%	±10%	< -10%
Santa María (1909)	-16.31	1.53	2.25	93.35	37.4	7.7	54.9
Inglis (1949)	-232.11	6.7	8.26	418.92	98.9	1.1	0
Inglis – Poona I (Inglis, 1949)	-25.86	2.21	2.8	144.76	97.8	1.1	1.1
Inglis – Poona II (Inglis, 1949)	-1003.27	15.57	17.15	1119.9	98.9	1.1	0
Laursen y Toch (1956)	0.4	0.31	0.42	24.8	30.8	<b>41.8</b>	27.5
Laursen (1960)	-0.56	0.5	0.68	33.72	56	22	22
Blench – Inglis I (Blench, 1969)	-36.74	3.22	3.32	250.24	97.8	2.2	0
Blench – Inglis II (Blench, 1969)	-8.49	1.57	1.67	97.97	0	1.1	98.9
Blench (1962)	-1.35	0.72	0.83	41.02	1.1	6.6	92.3
Laursen (1962)	0.05	0.4	0.53	26.15	29.7	26.4	44
Laursen (1963)	0.05	0.4	0.53	26.15	30.8	27.5	41.8
Larras (1963)	-1.01	0.6	0.77	62.24	78	16.5	5.5
Breusers (1965)	-5.44	1.26	1.37	75.07	1.1	0	98.9
Shen (1966)	-1130.05	16.08	18.2	1474.41	100	0	0
Arunachalam (1967)	-2.98	0.94	1.08	61.53	12.1	3.3	84.6
Coleman (1971)	-0.13	0.43	0.58	39.73	34.1	25.3	40.7
Hancu (1971)	-0.8	0.55	0.73	53.1	34.1	19.8	46.2
Neill (1973)	-1.23	0.69	0.81	44.37	11	3.3	85.7
Basak et al. (1975)	-0.36	0.42	0.63	45.76	44	<b>40.7</b>	15.4
CSU Equation (Richardson et al., 1975)	-4.41	1.1	1.26	86.19	95.6	3.3	1.1
Breusers et al. (1977)	0.56	0.27	0.36	20.2	41.8	<b>38.5</b>	19.8
Jain & Fischer (1980)	-5.41	0.52	0.61	34.65	84.2	15.8	0
Jain (1981)	-0.16	0.43	0.58	42.22	42.9	26.4	30.8
Zanke (1982)	-2.06	0.76	0.98	78.63	32.3	23.1	44.6
Melville y Sutherland (1988)	0.37	0.37	0.43	29.14	56	23.1	20.9
Johnson & Ayyub (1992)	-0.51	0.52	0.66	53.1	57.1	18.7	24.2
Kothyari et al. (1992b)	-0.47	0.54	0.66	31.53	1.1	14.3	84.6
Gao et al. (1993)	-0.55	0.52	0.67	52.01	72.5	22	5.5
Melville (1997)	-0.15	0.52	0.58	37.81	82.4	13.2	4.4

**Tabla 3. Desempeño de las ecuaciones de socavación local (continuación)**

Ecuación	R <sup>2</sup>	MAE	RMSE	MAPE (%)	> +10%	±10%	< -10%
Yanmaz (2001)	-1.37	0.66	0.83	51.48	72.5	19.8	7.7
Sheppard & Miller (2006)	<b>0.46</b>	<b>0.3</b>	<b>0.4</b>	<b>21.06</b>	<b>52.7</b>	<b>37.4</b>	<b>9.9</b>
Lee & Sturm (2009)	-1.83	0.6	0.75	40.23	54.2	21.7	24.1
Guo (2012)	-0.01	0.44	0.54	28.37	14.3	19.8	65.9
Sheppard et al. (2014)	<b>0.43</b>	<b>0.33</b>	<b>0.41</b>	<b>26.12</b>	<b>57.1</b>	<b>33</b>	<b>9.9</b>
Ettmer et al. (2015)	-2.52	0.96	1.02	81.19	<b>93.3</b>	5.6	1.1
Ecuación 65-1. Qi et al. (2016)	-10.13	1.6	1.81	104.48	<b>97.8</b>	2.2	0
Ecuación 65-2. Qi et al. (2016)	0.07	0.38	0.52	<b>23.22</b>	36.3	30.8	33
Sharafi et al. (2016)	-2.6	0.93	1.03	56.36	0	0	100
Pandey et al. (2018)	-0.08	0.45	0.56	30.07	16.5	14.3	69.2
Franzetti et al. (2022)	-0.2	0.49	0.55	28.87	72.2	16.7	11.1
Nandi & Das (2023)	-1.07	0.69	0.78	53.68	<b>82.4</b>	7.7	9.9
MdeC	-0.61	0.62	0.69	52.84	<b>85.7</b>	11	3.3

Las ecuaciones que predicen la mayor cantidad de observaciones con diferencias menores a 10% son las de Laursen y Toch (1956), Basak et al. (1975), Breusers et al. (1977), Sheppard y Miller (2006) y Sheppard et al. (2014). Sin embargo, la cantidad de observaciones bien predichas varía entre 31 y 41.8% del total, lo que se considera poco. En cambio, hay varias ecuaciones que producen estimaciones conservadoras: las tres ecuaciones propuestas por Inglis (1949), la ecuación de Blench-Inglis I (Blench, 1969), Shen (1966), CSU Equation (Richardson et al., 1975), Jain y Fischer (1980), Melville (1997), Ettmer et al. (2015), Ecuación 65-1 (Qi et al., 2016), Nandi y Das (2023) y MdeC (MOP, 2002). No obstante, de estas últimas ecuaciones, las ecuaciones de Inglis (1949), de Blench - Inglis I y II (Blench, 1969) y de Shen (1966) se descartan por tener errores demasiado grandes. Por su parte, las ecuaciones que tienen los mejores coeficientes de determinación y por lo tanto consideran las variables adecuadas de una forma también adecuada son las ecuaciones de Laursen & Toch (1956), Breusers et al. (1977), Melville & Sutherland (1988), Sheppard & Miller (2006) y Sheppard et al. (2014). En base a las métricas presentadas, las mejores fórmulas para predecir la socavación alrededor de cepas en escurrimientos supercríticos son las de Laursen & Toch (1956), Breusers et al. (1977), Sheppard & Miller (2006) y Sheppard et al. (2014). Estas cuatro ecuaciones tienen un buen porcentaje de las predicciones con errores menores al 10% y las demás en el lado conservador, presentan errores comparativamente bajos y un coeficiente de determinación relativamente alto. A continuación, la Figura 1 muestra la profundidad normalizada de socavación medida y calculada por estas cuatro ecuaciones.



**Figura 1. Profundidad de socavación normalizada, medida y calculada con las ecuaciones propuestas por Laursen y Toch (1956), Breusers et al. (1977), Sheppard y Miller (2006) y Sheppard et al. (2014) en casos con escurrimiento supercrítico.**

Se observa que las ecuaciones limitan el valor máximo calculado de la socavación normalizada a cerca de 2, lo que no es realista, ya que existen registros de profundidades normalizadas en torno a 3. En estos casos, las ecuaciones subestiman la socavación. Las ecuaciones de Sheppard y Miller (2006) y de Sheppard et al. (2014) son conservadores en la mayoría de los casos y tienen una precisión adecuada. Dado que la ecuación de Sheppard et al. (2014) corresponde a una versión mejorada de Sheppard y Miller (2006), se recomienda el uso de la ecuación de Sheppard et al. (2014) para estimar la socavación alrededor de cepas de puente en escurrimientos supercríticos.

## CONCLUSIÓN

La socavación local alrededor de cepas de puente en escurrimientos supercríticos ha sido poco estudiada. Se analizó el desempeño de las ecuaciones existentes en 91 casos medidos que se encuentran bien documentados en la literatura especializada.

Las ecuaciones propuestas por Laursen y Toch (1956), Breusers et al. (1977), Sheppard y Miller (2006) y Sheppard et al. (2014) tuvieron los mejores desempeños. Se recomienda el uso de la ecuación de Sheppard et al. (2014) para estimar la socavación alrededor de cepas de puente en escurrimientos supercríticos.

En el futuro, se debería ampliar el rango de los parámetros que influyen en la socavación local, particularmente el número de Froude y el tamaño de los sedimentos, a fin de verificar los resultados obtenidos en el presente trabajo.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento entregado por la ANID a través del proyecto Fondecyt Regular 1221341: Local Scour at Bridge Piers in Supercritical Flows y la beca Doctorado Nacional/2025–21252243.

## REFERENCIAS

Anubhav Baranwal, Bhabani Shankar Das; Scouring around bridge pier: A comprehensive analysis of scour depth predictive equations for clear-water and live-bed scouring conditions. *AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems and Society* 1 March 2024; 73 (3): 424–452. doi: <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.235>

Arunachalam, K., 1965, Scour around bridge piers: J. of the Indian Roads Congress (No.2), August, pp. 189/210.

Arunachalam, K., 1967, Discussion to Neill (1965): Proc. Inst. Civ. Eng., London, 36, pp. 402/404.

Baranwal, A., & Das, B. S. (2024). Live-bed scour depth modelling around the bridge pier using ANN-PSO, ANFIS, MARS, and M5Tree. *Water Resources Management*, 38(12), 4555-4587.

Basak, V., Basamisli, Y., & Ergun, O. (1975). Maximum equilibrium scour depth around linear-axis square cross-section pier groups. *Devlet su Isteri Genel Mudurlugu, Ankara, Turkey*.

Bascuñán Campos, J.L. (2024). Análisis experimental de la socavación alrededor de un cilindro en escurrimiento supercrítico.

Blench, T., Bradley, J. N., Joglekar, D. V., Bauer, W. J., Tison, L. J., Chitale, S. V., ... & Romita, P. L. (1962). Discussion of "Scour at Bridge Crossings". *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 127(1), 180-207.

Breusers, H. N. C. (1965). Scouring around drilling platforms. *J. Hydraul Res. IAHR, Bull.*, 19, 276.

Breusers, H. N. C., Nicollet, G., & Shen, H. W. (1977). Local scour around cylindrical piers. *Journal of hydraulic research*, 15(3), 211-252.

Chee, R. K. W. (1982). Live-bed scour at bridge piers. *Publication of: Auckland University, New Zealand*, (290).

Chiew, Y. M. (1984). *Local scour at bridge piers* (Doctoral dissertation, ResearchSpace@Auckland).

Coleman N. L. 1971 Analyzing laboratory measurements of scour at cylindrical piers in sand beds. In: Proc. 14th Congress IAHR, International Association of Hydraulic Research. International Association for Hydraulic Research, Madrid, Spain, pp. 307–313.

Ettmer, B., Orth, F., & Link, O. (2015). Live-bed scour at bridge piers in a lightweight polystyrene bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(9), 04015017.

Franzetti, S., Radice, A., Rebai, D., & Ballio, F. (2022). Clear water scour at circular piers: A new formula fitting laboratory data with less than 25% deviation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 148(10), 04022021.

Gao D., Posada G. & Nordin C. F. 1993 Pier scour equations used in the People's Republic of China-Review and summary. FHWA-SA-93076. US Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, DC, USA, pp. 1031–1036.

Breusers, H. N. C., Nicollet, G., & Shen, H. W. (1977). Local scour around cylindrical piers. *Journal of hydraulic research*, 15(3), 211-252.

Kothyari, U. C., Ranga Raju, K. G., & Garde, R. J. (1992). Live-bed scour around cylindrical bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 30(5), 701-715.

Hancu, S. (1971). Sur le calcul des affouillements locaux dans la zone des piles des ponts. In *Proceedings of the 14th IAHR congress, Paris, France* (Vol. 3, No. 1, pp. 299-313). Hydraulic Research, 50:1, 18-27, DOI: 10.1080/00221686.2011.644418

Inglis S. C. 1949 Maximum depth of scour flatheads of guide bands and groynes, pier noses, and downstream bridges-the behavior and control of rivers and canals. Indian Waterways Experimental Station, Poona, India, 327–348.

Jain, S. C. (1981). Maximum clear-water scour around circular piers. *Journal of the Hydraulics Division*, 107(5), 611-626.

Jain, S. C., & Fischer, E. E. (1979). *Scour around circular bridge piers at high Froude numbers* (No. FHWA-RD-79-104). United States. Department of Transportation. Federal Highway Administration.

Jain, S. C., & Fischer, E. E. (1980). Scour around bridge piers at high flow velocities. *Journal of the Hydraulics Division*, 106(11), 1827-1842.

Johnson, P. A., & Ayyub, B. M. (1992). Assessing time-variant bridge reliability due to pier scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(6), 887-903.

Guo, J. (2012). Pier scour in clear water for sediment mixtures. *Journal of hydraulic research*, 50(1), 18-27.

Larras, J. (1963). Profondeurs maximales d'erosion des fonds mobiles autour des piles en riviere. *Ann. Ponts Chaussees*, 133, 411-424.

Laursen, E. M. (1960). Scour at bridge crossings. *Journal of the Hydraulics Division*, 86(2), 39-54.

Laursen, E. M. (1962). Scour at bridge crossings. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 127(1), 166-180.

Laursen, E. M. (1963). An analysis of relief bridge scour. *Journal of the Hydraulics Division*, 89(3), 93-118.

Laursen, E. M., & Toch, A. (1956). *Scour around bridge piers and abutments* (Vol. 4). Ames, IA: Iowa Highway Research Board.

Lee, S. O., & Sturm, T. W. (2009). Effect of sediment size scaling on physical modeling of bridge pier scour. *Journal of hydraulic engineering*, 135(10), 793-802.

Link, O., Castillo, C., Pizarro, A., Rojas, A., Ettmer, B., Escauriaza, C., & Manfreda, S. (2017). A model of bridge pier scour during flood waves. *Journal of hydraulic research*, 55(3), 310-323.

Link, O., Henriquez, S., & Ettmer, B. (2019). Physical scale modelling of scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 57(2), 227-237.

Link O & Dey S. (2025) "Santa María and the first bridge scour formulas". *Journal of Hydraulic Engineering* 151(1). <https://doi.org/10.1061/JHEND8.HYENG-14216>

Martínez, B., Guerra, M., Riviere, N., Mignot, E., & Link, O. (2025). RANS simulation of supercritical open channel flows around obstacles. *Journal of Hydraulic Research*, 63(1), 1-14.

Melville, B. W. (1984). Live-bed scour at bridge piers. *Journal of hydraulic engineering*, 110(9), 1234-1247.

Melville, B. W. (1997). Pier and abutment scour: integrated approach. *Journal of hydraulic Engineering*, 123(2), 125-136.

Melville, B. W., & Sutherland, A. J. (1988). Design method for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(10), 1210-1226.

Mignot, E., Moyne, T., Doppler, D., & Rivière, N. (2016). Clear-water scouring process in a flow in supercritical regime. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(4), 04015063.

Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad. (2002). *Manual de carreteras. Volumen 3: Instrucciones y criterios de diseño*. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.

Nandi, B., & Das, S. (2023). Identify most promising temporal scour depth formula for circular piers proposed over last six decades. *Ocean Engineering*, 286, 115639.

Neil, C. R. (1973). *Guide to Bridge Hydraulics*. Roads and Transportation Association of Canada.

Pandey, M., Sharma, P. K., Ahmad, Z., & Karna, N. (2018). Maximum scour depth around bridge pier in gravel bed streams. *Natural hazards*, 91(2), 819-836.

Pizarro, A., Manfreda, S., & Tubaldi, E. (2020). The science behind scour at bridge foundations: A review. *Water*, 12(2), 374.

Qi, M., Li, J., & Chen, Q. (2016). Comparison of existing equations for local scour at bridge piers: parameter influence and validation. *Natural Hazards*, 82(3), 2089-2105.

Richardson, E. V., Karaki, S., Mahmood, K., Simons, D. B., & Stevens, M. A. (1975). *Highways in the River Environment—Hydraulic and Environmental Design Considerations: Basic Course Instructor's Lesson Plans* (No. FHWA-NHI-76-N004). United States. Department of Transportation. Federal Highway Administration.

Rivière, N., Vouaillat, G., Launay, G., & Mignot, E. (2017). Emerging obstacles in supercritical openchannel flows: Detached hydraulic jump versus wall-jet-like bow wave. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(7), 04017011.

Roux, S., Link, O., Riviere, N., & Mignot, E. (2022). Live-bed pier scour in supercritical open-channel flows. *Journal of Hydraulic Research*, 60(4), 675-685.

Santa María, D. V. (1909). Determinación de las Profundidades de socavación de las aguas corrientes. In *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile* (No. 2, pp. ág-67).

Sharafi, H., Ebtehaj, I., Bonakdari, H., & Zaji, A. H. (2016). Design of a support vector machine with different kernel functions to predict scour depth around bridge piers. *Natural Hazards*, 84(3), 2145-2162.

Shen, H. W., Schneider, V. R., & Karaki, S. (1966). Mechanics of local scour: supplement, methods of reducing scour.

Shen, H. W., Schneider, V. R., & Karaki, S. S. (1966). Mechanics of local scour. US Department of Commerce, National Bureau of Standards. *Institute for Applied Technology*.

Sheppard, D. M., & Miller Jr, W. (2006). Live-bed local pier scour experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(7), 635-642.

Sheppard, D. M., Melville, B., & Demir, H. (2014). Evaluation of existing equations for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(1), 14-23.

Yanmaz M. A. 2001 Uncertainty of local scour parameters around bridge piers. *Journal Engineering and Environmental Science* 25 (4), 127–137.

White, W. R. (1975) "Scour Around Bridge Piers in Steep Streams," Proceedings of the 16th I.A.H.R. Congress, Sao Paulo, Vol. 2, 1975, pp. 279–284.

Zanke U. 1982 Scour at piles in steady flow and under the influence of waves ("Kolke am Pfeiler in richtungskonstanter Strömung und unter Welleneinfluss," in German). *Mitteilungen des Franzius-Instituts, University of Hannover, Hannover, Germany*.