Horizonte Académico
Revista Multidisciplinaria
Recibido:09/08/2025 Aprobado:10/09/2025

DOI: https://doi.org/10.70208/3007.8245.v5.n3.228

Modelación integrada HEC-HMS – HEC-RAS para el análisis de socavación de puentes, caso puente Virú

Gonzalo Ramcés Fano Miranda[1]
gfano16@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-4401-8654
Universidad Nacional Agraria La Molina
Perú

Gonzalo Rodrigo Fano Loayza
rodrigo.fano@pucp.pe
https://orcid.org/0000-0002-3847-0554
Universidad Nacional Agraria La Molina
Perú

RESUMEN

Poder construir estructuras que puedan tener un buen desempeño frente a eventos o fenómenos naturales es importante, debido a lo que puede llegar a significar su falla, por ejemplo, pérdidas de vidas humanas y pérdidas económicas. Una de las estructuras que se puede encontrar potencialmente afectada por la naturaleza son los puentes que cruzan sobre ríos. El diseño de los puentes que se encuentran en ríos tiene dos factores importantes a tener en cuenta: la altura del agua, que podría subir en épocas de avenidas, y afectar al tablero del puente, y la profundidad de socavación que podría presentarse en la subestructura. Puentes como el que se encuentra sobre el río Virú, cumplen un papel importante; sin embargo, este se vio afectado durante el último fenómeno El Niño, en el cual tuvo el descenso de una parte, creando un desnivel lo que lo hizo intransitable. Es debido a esto que la presente investigación busca encontrar por un lado cuál sería una buena altura para el tablero del puente, siguiendo lo establecido por el Misterio de Transporte y Comunicaciones, y además la socavación general por contracción y local en pilares y estribos para el puente modelado

***Palabras clave**:* puentes, socavación, río virú, fenómeno el niño, diseño hidráulico

[1] Autor principal.
Correspondencia: gfano16@gmail.com

HEC-HMS–HEC-RAS Modeling for Bridge Scour Analysis: The Case of the Virú Bridge

ABSTRACT

Being able to build structures that can perform well against natural events or phenomena is important, due to what their failure can mean, for example, loss of human lives and economic losses. One of the structures that can be found potentially affected by nature are the bridges that cross over rivers. The design of bridges that are located on rivers has two important factors to take into account: the height of the water, which could rise in times of floods, and affect the bridge deck, and the depth of scour that could occur in the substructure. Bridges like the one over the Virú River play an important role; however, this was affected during the last El Niño phenomenon, in which part of it fell, creating a gap that made it impassable. It is due to this that the present investigation seeks to find, on the one hand, what would be a good height for the bridge deck, following what is established by the Ministry of Transport and Communications, and also the general scour due to contraction and local in pillars and abutments for the modeled bridge.

***Keywords**:* bridges, scour, virú river, el niño phenomenon, hydraulic design

Introducción

Los puentes son estructuras que han ayudado al desarrollo de las civilizaciones debido a su función de conectar de forma directa dos puntos, los cuales, de forma natural a veces, se tendría que hacer un gran recorrido para llegar de un punto otro. Asimismo, tienen la bondad de poder pasar sobre diferentes accidentes, así como también sobre otros caminos hechos por el hombre evitando cruces no deseados. En el caso particular cuando se construye un puente sobre un río, la importancia de los factores que se consideran en su diseño apunta a la seguridad frente a efectos de la naturaleza y cómo el puente interactúa con ellos.

En un río en donde se tiene registro que presenta evento de máximas, el incremento del nivel del agua y la socavación son dos variables que se deben de considerar por el impacto perjudicial que pueden causar en la estructura de un puente. En el caso del primero, el aumento del nivel puede perjudicar directamente la transitividad de los usuarios sobre el tablero del puente, también comprometiendo a esta parte del puente debido a que no fue diseñada para ese tipo de interacción. Respecto al segundo, la socavación, este es un fenómeno que se presenta sin la necesidad de que haya intervención humana y que cualquier estructura que se coloca en el cauce se ve afectada por ella.

La socavación es un fenómeno que se clasifica según cuales sean las variables que se consideran. La socavación general por contracción es aquella que se presenta cuando se modifica el ancho del cauce, ya sea de forma natural como por intervención humana, lo que ocasiona una reducción en el área por donde pasa el flujo. Por otro lado, la interacción que tienen los elementos estructurales, como pilares y estribos, con el flujo, produce un efecto de socavación focalizado alrededor de estos llamado socavación local.

Es así que en el caso de la ubicación del puente Virú, es necesario al momento de su diseño tener en cuenta el espacio libre entre la parte inferior del tablero y la superficie del flujo, y en cuanto a la socavación, considerar a la socavación general por contracción, la socavación local en pilares, debido a la longitud del ancho del cauce y el tipo de vehículos que transitan sobre este, y en estribos, que es donde se ubican ambos extremos de la superestructura.

Metodología

- Variables

Variables independientes: las máximas avenidas, los factores geomorfológicos, hidráulicos y geotécnicos y la geometría del puente

Variables dependientes: el gálibo, el NAME, la socavación general, debido a contracción y la socavación local en pilares y estribos

- Estrategia de desarrollo

La investigación se ha divido en las siguientes partes:

Modelamiento de la cuenca y procesamiento de la información obtenida a partir de las estaciones pluvioméricas, para los periodos de retorno de 50, 100 y 500 años.

Modelamiento hidrológico, en el cual se realizó la calibración de los valores obtenidos por las estaciones pluviométricas por medio de los valores observados en la estación hidrométrica Huacapongo. Con los parámetros optimizados, se realizó la simulación para conocer el caudal de descarga en la ubicación del puente para los periodos de retorno de 100 y 500 años.

El modelamiento hidráulico en el cual, con el caudal de descarga de 100 años de periodo de retorno, usando el programa HEC-RAS, se calculó la altura libre del puente y el NAME. Por otro lado, con el caudal de 500 años de periodo de retorno, se ha calculado la socavación general por contracción, por dos métodos y la socavación local en pilares y estribos por dos métodos en cada uno.

- Etapas realizadas

a) Recopilación de la Información

Información de las estaciones pluviométricas cercanas a la cuenca de estudio.

Información de la estación hidrométrica aguas arriba en el río de la ubicación de la zona de estudio.

Información topográfica de la cuenca de estudio

Mapas de curvas número para condiciones normales, secas y húmedas del Perú.

Información batimétrica de cercana a la zona de estudio

Estudio de suelos de la zona de estudio

b) Ejecución

Se comenzó con la delimitación de la cuenca y subcuencas, detallando las características morfométricas de estas. Luego se procesó la información pluviométrica, estableciendo cuales estaciones se usarán en el modelamiento hidrológico, por medio de los polígonos de Thiessen. Con la información de las estaciones pluviométricas, se pudo realizar el análisis de frecuencias de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas y con este se obtuvo las intensidades máximas, con la distribución SCS Tipo II.

Para el modelamiento hidrológico, el método de ingreso de datos, fue según el esquema del HEC-HMS, empezando por el modelo de cuenca, en donde se consideró en primer lugar para las subcuencas, las pérdidas, por medio del Número de Curva, y la escorrentía directa, usando el método de Clark. En este último método, para el tiempo de concentración, se consideró el método de Kirpich y el método de Temez. Para el movimiento de flujo en los tramos, se tomó en cuenta el método de Muskingum, con sus variables K y X. Seguidamente, el segundo componente del esquema fue el modelo meteorológico, en donde se estableció la relación entre cada subcuenca con las estaciones que tienen un aporte en ella y cuánto es la representatividad de cada estación en cada subcuenca. El tercer componente fue el control de especificaciones donde se estableció la duración de cada intervalo. Y el último componente es la serie de tiempo en donde se creó la variable Precipitation Gages, para ingresar los valores de intensidad de lluvia y se definió el intervalo de 1 hora. En este último componente, se ingresó la variable Discharge Gages para la calibración.

Para el modelamiento hidráulico, se corrió el modelo con el caudal del periodo de retorno de 100 años para el cálculo de la altura libre del puente y el NAME. Por otra parte, el cálculo de la socavación general se realizó por medio del método de Laursen modificado usando el software HEC-RAS y además se realizó de forma manual empleando el método de Lischtvan-Levediev. Para el cálculo de la socavación local en pilares y estribos, se utilizó también el software HEC-RAS. En el caso de los pilares, se emplearon el método del CSU y el método de Froehlich, variando las formas de las narices que cortan el flujo del caudal, y para el caso de los estribos, el método de Froehlich y el método de Hire.

c) Materiales y equipos

Programa ArcMap 10.5

Programa Hidroesta2

Programa HEC-HMS 4.6

Programa HEC-RAS 5.0.7

Programa Microsoft Excel 2019

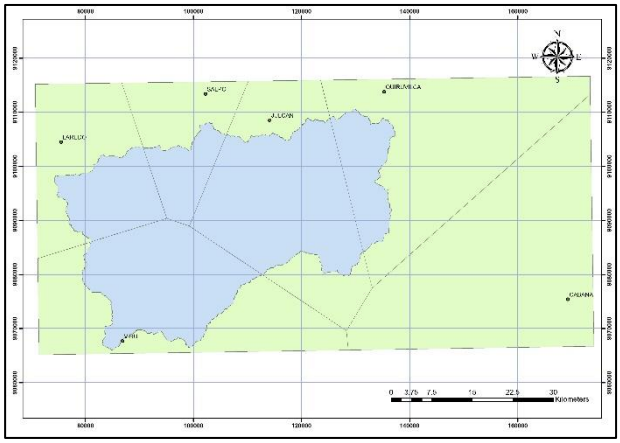
Programa Microsoft Word 2019

- Análisis de los datos pluviométricos y la distribución de frecuencias

La información acerca de las precipitaciones, se obtienen de las estaciones pluviométricas que tienen influencia en la cuenca de estudio, teniendo en cuenta que esta información es fundamental para un análisis de este tipo, los resultados que se hallen de esta, dependen de la cantidad y calidad de los datos que se encuentren disponibles.

En primer lugar, se encontró las estaciones cercanas a la cuenca de estudio que tienen influencia por medio del polígono de Thiessen (Chow, 1994) como se muestra a continuación:

Figura 1. Poligonación por medio del método de Thiessen



Fuente: Elaboración propia

De los datos pluviométricos obtenidos, se encontraron las precipitaciones máximas anuales en 24 horas de cada una de las siguientes estaciones pluviométricas:

Tabla 1. Ubicación de las estaciones pluviométricas

Estaciones	Altitud (m.s.n.m.)	Latitud	Longitud
Laredo	253.31	-8.083333	-78.85
Salpo	3418.65	-8.005333	-78.607111
Julcan	3431.45	-8.05	-78.5
Quiruvilca	4037.57	-8.004222	-78.307722
Virú	75.88	-8.416667	-78.75

Fuente: Elaboración propia

El análisis de frecuencia de las precipitaciones máximas anuales en 24 horas se realizó por métodos analíticos, para lo cual se consideró lo que señala acerca de este el MTC (2014). La distribución para cada estación, luego de evaluar para cada estación, utilizando el programa Hidroesta 2 fue la siguiente:

Tabla 2. Distribución de ajuste para las estaciones consideradas

Estación	Distribución	Δmáx calculado	Δ tabular	Probabilidad
Laredo	Gumbel	0.1554	0.2178	0.05
Salpo	Gumbel	0.0624	0.1834	0.05
Julcan	Gumbel	0.1120	0.1834	0.05
Quiruvilca	Normal	0.1326	0.1868	0.05
Virú	Gumbel	0.3975	0.3041	0.05

Fuente: Elaboración propia

Con las distribuciones elegidas se encontraron las precipitaciones máximas para los tiempos de retorno de 50, 100 y 500 años que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3. Precipitaciones máximas para los tiempos de retorno en cada una de las estaciones

Estaciones	Precipitación máxima (mm)		
	50	100	500
Laredo	17.62	20.39	26.79
Salpo	51.72	57.25	70.05
Julcan	54.73	59.78	71.43
Quiruvilca	56.74	63.14	77.93
Virú	2.36	2.79	3.8

Fuente: Elaboración propia

Con los valores de precipitación máxima para los periodos de retorno de 50, 100, 500 años y la distribución SCS de tormenta de 24 horas Tipo II (climas genéricos), primero se calculó los intervalos de precipitación y luego, con estos, los valores de intensidades de lluvia.

Análisis del modelo hidrológico

Al estar simulando el caudal de descarga a partir de datos de precipitación, es necesario realizar una calibración con valores observados en el tramo del rio donde se realiza el estudio. Para esto se utilizó los valores de la estación hidrométrica Huacapongo. Los parámetros del modelo hidrológico que se

ajustaron en la calibración fueron: SCS Curve Number en Loss, Clark Unit Hydrograph en Transform y Muskingum-K en Routing. Por medio de las optimizaciones, se pudo encontrar la función objetivo con la que se obtenía un mayor coeficiente de Nash-Sutcliffe. Con los nuevos valores de los parámetros calibrados, se realizó la simulación para los tiempos de retorno de 100 años y de 500 años de periodo de retorno, obteniendo finalmente los valores de caudal de descarga para ambos periodos de retorno en la ubicación del puente, los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4. Caudales de descarga para los periodos de retorno de 100 y 500 años

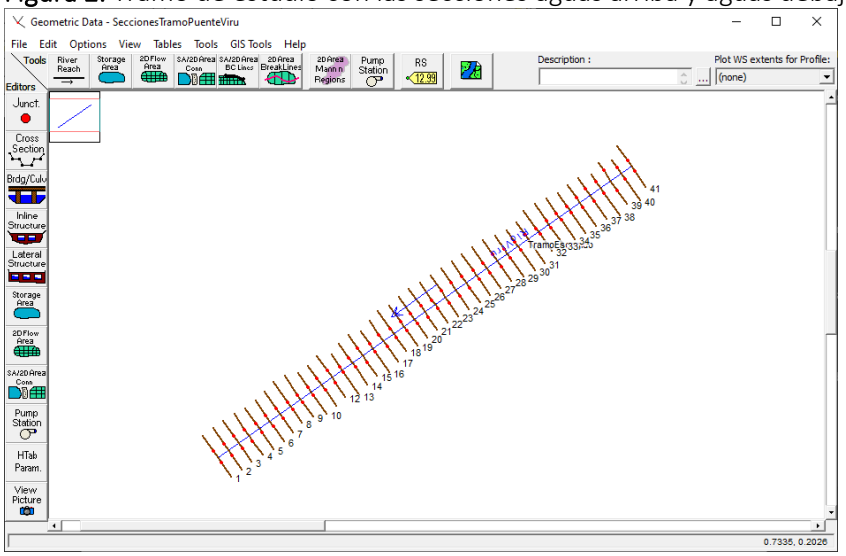
Periodo de retorno (años)	Caudal de descarga (m3/s)
100	242.0
500	342.8

Fuente: Elaboración propia

Análisis del modelo hidráulico

Luego de obtenidos los caudales de descarga para los periodos de retorno de 100 y 500 años, utilizando el programa HEC-RAS 5.0.7, se introdujo las secciones del tramo del rio, 800 metros aguas arribas y 800 metros aguas debajo de la ubicación del puente Virú ubicadas cada 20 metros como se muestra en la siguiente imagen.

Figura 2. Tramo de estudio con las secciones aguas arriba y aguas debajo del puente



Fuente: Elaboración propia

Asimismo, en cada sección se definió sus respectivos coeficientes de contracción y expansión, de acuerdo a como se desarrolla cada tramo en campo y siguiendo lo establecido por el US Army Corps of Engineers (2016), que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 5. Coeficientes de contracción y expansión de acuerdo a la transición

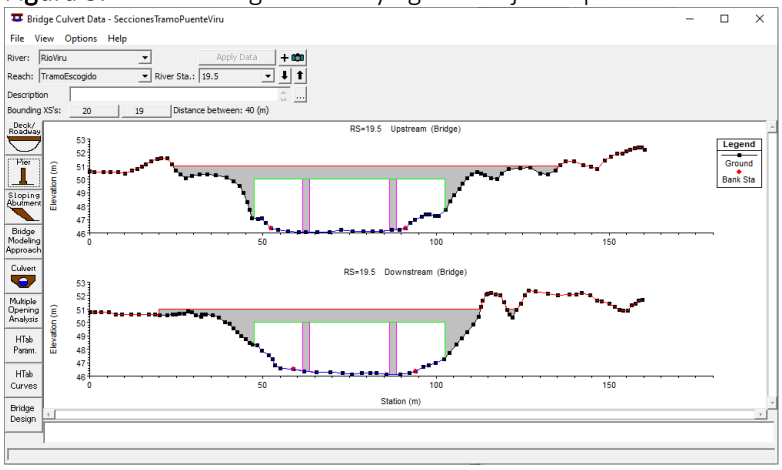
	Contraction	Expansion
No transition los computed	0.0	0.0
Gradual transitions	0.1	0.3
Typical Bridge sections	0.3	0.5
Abrupt transitions	0.6	0.8

Fuente: Elaboración propia

Además, también se estableció para cada sección su respectivo coeficiente de Manning de acuerdo con una comparación visual de la zona con lo descrito por el MTC (2014).

Una vez se tuvo el canal modelado, se pasó al modelamiento del puente. Para este modelamiento se dimensionó la subestructura del puente, conformada por dos estribos a cada lado del canal y dos pilares, distribuidos de forma equidistante. Además, se dimensionó el tablero del puente. Para ubicar el puente, el programa HEC-RAS pide ubicarlo entre dos de las secciones colocadas anteriormente (US Army Corps of Engineers, 2016), una de ellas la sección aguas abajo y la otra la sección aguas arriba. No obstante, cuando se dimensiona la subestructura y el tablero, se especifica también cual es la distancia entre el tablero y la sección aguas arriba, la que en este caso es la que se encuentra en la ubicación del puente. El puente modelado visto desde la sección aguas arriba y la sección de aguas abajo, se puede ver en la siguiente figura:

Figura 3. Secciones agua arriba y aguas abajo del puente modelado



Fuente: Elaboración propia

Ya con el canal y el puente modelado, se pudo correr la simulación para hallar el gálibo y el NAME que ocurre en el puente, para lo cual se ingresó el caudal de 100 años de periodo de retorno.

Análisis de la socavación

Respecto a lo ya hecho, solo se necesita modificar el caudal y ahora ingresar el de 500 años de periodo de retorno, y luego se pasa a la modelación de la socavación. En la socavación se calcularon dos tipos: la socavación general por contracción y la socavación local en pilares y estribos.

Respecto a la socavación general por contracción se realizaron por dos métodos, el primero por Litschvan-Levediev, haciendo los cálculos en Excel y el segundo Laursen modificado, el cual es el método que usa el programa HEC-RAS 5.0.7.

a) Método de Litschvan-Levediev

Por medio de este método, menciona Juarez y Rico (1984), se puede calcular la socavación general en el cauce en temporadas de máximas avenidas, tanto si se considera la presencia de un puente como si solo el ancho natural del cauce. Dentro del procedimiento se debe considerar el factor de contracción μ cuando se considera la presencia de un puente. La profundidad luego de ocurrida la socavación depende de cuál es el tipo de suelo que se encuentra donde se analiza la socavación:

Para suelos cohesivos:

$$Hs = \left(\frac{\alpha h^{\frac{5}{3}}}{0.60 \beta \mu \phi_c {\gamma_s}^{1.18}} \right)^{\frac{1}{1+x}}$$

(1)

Para suelos no cohesivos:

$$Hs = \left(\frac{\alpha {H_o}^{\frac{5}{3}}}{0.68 \beta \mu \phi_c {d_m}^{0.28}} \right)^{\frac{1}{1+x}}$$

(2)

Siendo α para ambos casos:

$$\alpha = \frac{Q_d}{{H_m}^{5/3} B_e}$$

(3)

Dónde:

Hs: Tirante después de ocurrida la socavación (m)

Ho: Tirante inicial existente (m)

α: Coeficiente de sección

Qd: Caudal de diseño relacionado al tiempo de retorno (m3/s)

Hm: Profundidad media (m), se define Hm= A/Be

A: Área hidráulica (m2)

Be: Ancho efectivo de la superficie del agua en la sección

μ: Coeficiente de contracción

ϕ_c: Coeficiente de corrección por efecto de la densidad del agua durante el tiempo de avenida, para agua clara el valor es 1. Si transporta sedimentos en suspensión se usa la siguiente ecuación: $\phi_c = - 0.54 + 1.5143\ \gamma_{as}$

γ_{as}: Peso específico del agua más sedimento (T/m^3)

γ_s: Peso específico del sedimento del lecho (T/m^3)

d_m: Diámetro característico del lecho (mm)

x: Exponente que depende del peso volumétrico en suelos cohesivos y del diámetro medio en suelos no cohesivos

b) Método de Laursen modificada

En este método se plantea que la socavación general es el descenso del fondo del río en puntos en los que disminuye el ancho debido al incremento de la velocidad de la corriente en ese punto debido al angostamiento que ocasiona la colocación de una estructura en el cauce (Basile ,2018). La ecuación de este método plantea una relación entre la profundidad media después de la socavación y la profundidad media aguas arriba.

$$\frac{H_s}{h_1} = \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^{0.857} \left(\frac{B_1}{B_2}\right)^{K1}, d_S = H_s - h_2$$

(4)

Dónde:

ds: Profundidad media de socavación por contracción (m)

Hs: Profundidad media del flujo en la sección contraída después de la socavación (m)

h1: Profundidad media del flujo en todo el cauce aguas arriba (m)

h2: Profundidad media del flujo en la sección contraída antes de la socavación (m)

Q1: Caudal en la sección aguas arriba (m3/s)

B1: Ancho del cauce principal aguas arriba (m)

K1: Exponente en función del modo de transporte de sedimento, HEC-RAS calcula K1 a partir del valor de d50 y la temperatura del agua (15.6°C)

Q2: Caudal en sección contraída del puente (m3/s)

B2: Ancho del cauce principal en la sección contraída (m)

Respecto a la socavación local, se puede analizar en los pilares y estribos. El programa HEC-RAS ofrece para el cálculo de la socavación en los pilares el método de la Universidad Estatal de Colorado (CSU) y el método de Froehlich, Asimismo, para la socavación en estribos, se tiene en este programa el método de Froehlich y el método de Hire.

c) Método de la Universidad Estatal de Colorado (CSU)

Este método permite calcular la socavación local en pilares, tanto para los tipos de lecho móvil y agua clara, los cuales se diferencian por la presencia y cantidad de partículas de sedimento que trae el caudal. La base de este método es el análisis dimensional de los parámetros que influyen en este tipo de socavación como en los datos de laboratorio. La ecuación de este método busca encontrar la relación entre la profundidad de socavación local y la profundidad de flujo aguas arriba del pilar (MTC, 2014).

$$\frac{Y_s}{h} = 2.0 K_f K_\phi K_c K_a \left(\frac{h}{a}\right)^{0.65} {F_r}^{0.43}$$

(5)

Donde:

Ys: Profundidad de socavación local (m).

h: Profundidad de flujo aguas arriba del pilar (m).

Kf: Factor que toma en cuenta la forma del pilar.

Kϕ: Factor que considera el ángulo de ataque del flujo

Kc: Factor que toma en cuenta la forma del lecho

Ka: Factor que toma el acorazamiento del sedimento del lecho

a: Ancho del pilar (m)

l: Longitud del pilar (m)

Fr: Número de Froude en la sección aguas arriba del pilar igual a $V/\sqrt{gh}$.

V: Velocidad media del flujo directamente aguas arriba del pilar

d) Método de Froehlich para socavación local en pilares

De la misma forma que el método del CSU, indica el MTC (2014), este método en su ecuación considera la forma del pilar, para lo cual aplica un factor de corrección, el ancho del pilar y el ángulo de ataque con la que el agua interactúa con la superficie del pilar. Además, también considera valores de la granulometría.

$$Y_s = 0.32K_f(a')^{0.62}h^{0.47}F_r^{0.22}D_{50}^{-0.09} + a$$

(6)

Donde:

Ys: Profundidad de socavación local (m)

Kf: Factor de corrección de acuerdo a la forma del pilar.

a': Ancho proyectado del pilar con relación al ángulo de ataque del flujo (m)

a: Ancho del pilar adicionado como un factor de seguridad (m)

h: Profundidad de flujo aguas arriba del pilar (m)

Fr: Numero de Froude en la sección aguas arriba del pilar.

D50: Diámetro de la partícula del lecho en una mezcla cuyo 50% es menor (mm)

e) Método de Froehlich para estribos

Este método tiene como base dos tipos de análisis; el dimensional y el de regresión. Es aplicable para cuando se tiene lecho móvil y agua clara, así como también cuando los estribos se encuentran dentro o fuera del cauce y cuando el flujo solo está en el cauce principal o incluye también las áreas inundadas. La ecuación de este método busca calcular la relación entre la profundidad de socavación y la profundidad media en el área obstruida por el estribo (MTC, 2014).

$$\frac{Y_S}{h_e} = 2.27 K_f K_\theta \left(\frac{L}{h_e}\right)^{0.43} {F_{re}}^{0.61} + 1$$

(7)

Dónde:

Ys: Profundidad de socavación (m)

Kf: Factor que depende de la forma del estribo (ver Figura 27)

KΘ: Factor que depende del ángulo del ataque del flujo (ver Figura 28)

he: Profundidad media del flujo en la zona obstruida por el estribo (m), donde he=Ae/L, siendo Ae el área de flujo de la sección aguas arriba obstruida a causa de los estribos (m2)

Lest: Longitud del estribo y acceso al puente que se opone al paso del flujo (m)

F_{re}: Número de Froude en la zona obstruida por el estribo

f) Método de Hire

Este método fue obtenido a partir de datos de socavación en espigones ubicados en el río Mississipi, por lo que en este caso el estribo sí debe encontrarse dentro del cauce principal (MTC, 2014).

$$Y_S = 4h \left(\frac{K_f}{0.55}\right) K_\theta {F_r}^{0.33}$$

(8)

Dónde:

Ys: Profundidad de socavación (m)

Kf: Factor que depende de la forma del estribo. Tiene los mismos valores mencionados en el método de Froehlich.

KΘ: Factor que depende del ángulo del ataque del flujo, donde KΘ= (Θ/90)0.13, cuando θ es menor a 90°, el estribo se encuentra inclinado hacia aguas abajo y es mayor, cuando esta inclinado hacia aguas arriba.

h: Profundidad media del flujo en la zona obstruida por el estribo (m)

Lest: Longitud del estribo y acceso al puente que se opone al paso del flujo (m)

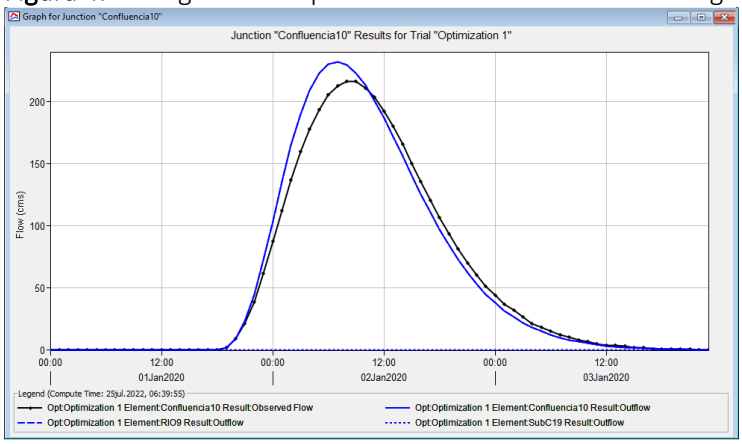
Fr: Número de Froude en la zona obstruida por el estribo

RESULTADOS

Del modelo hidrológico

De la calibración de la información simulada y los datos observados se obtuvo el siguiente hidrograma:

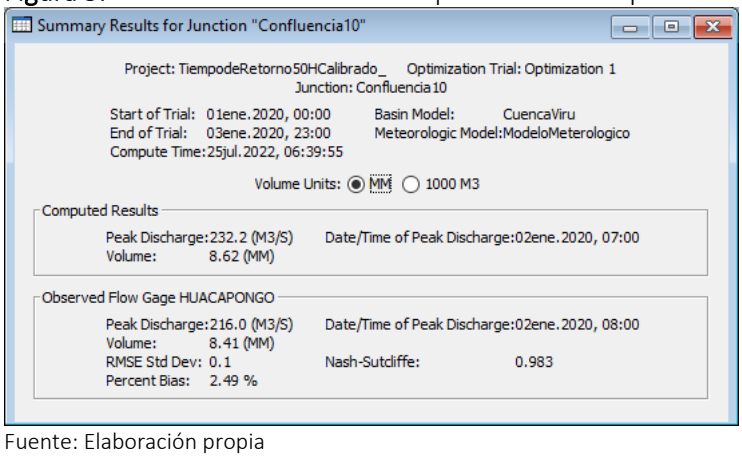
Figura 4. Hidrograma comparativo entre el caudal de descarga simulado y el de calibración



Fuente: Elaboración propia

En el reporte de sus resultados es donde se puede ver, además de los valores pico y los volúmenes, el coeficiente de Nash-Sutcliffe, por el cual se eligió la función objetivo.

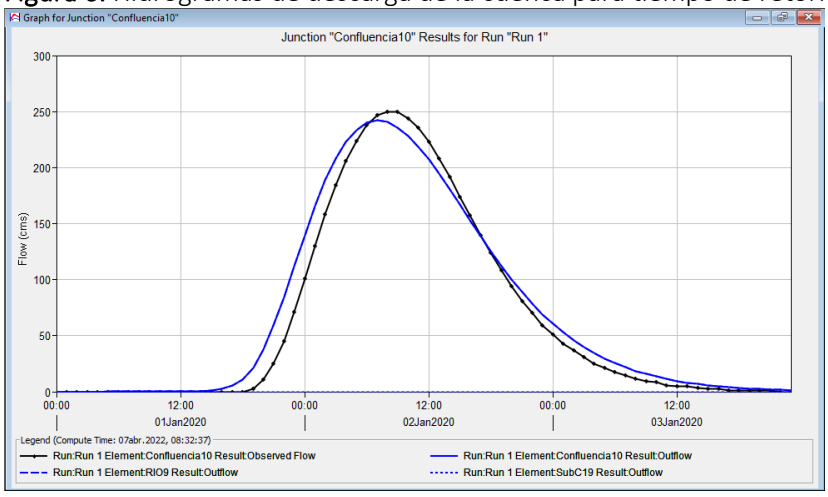
Figura 5. Resumen de los resultados para 50 años de periodo de retorno



Fuente: Elaboración propia

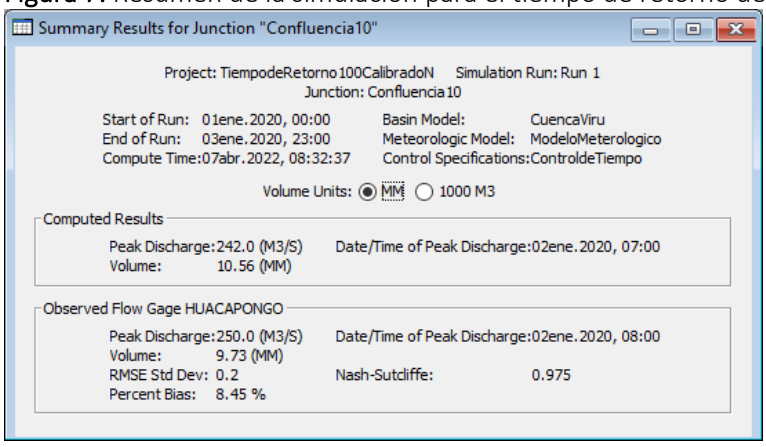
En la simulación del caudal con tiempo de retorno de 100 años se puede ver en su respectivo hidrograma, así como en su reporte de resultados, que la compatibilidad, medida por el coeficiente de Nash-Sutcliffe es muy cercana a 1.

Figura 6. Hidrogramas de descarga de la cuenca para tiempo de retorno de 100 años. Fuente:



Elaboración propia

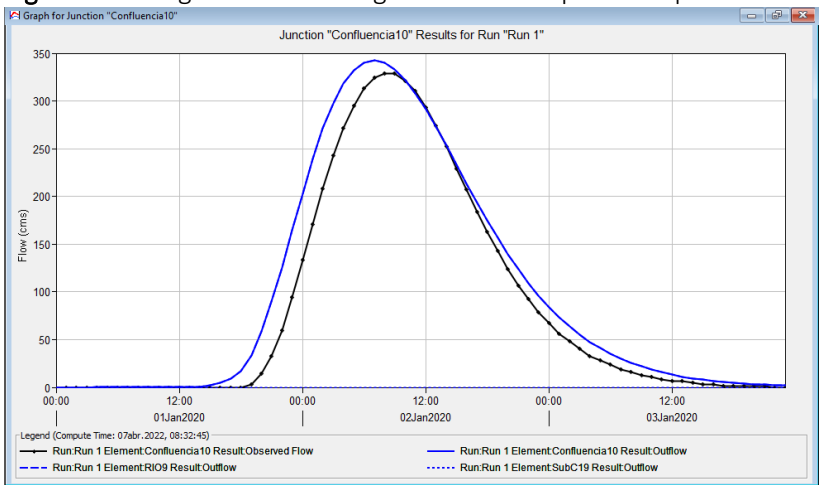
Figura 7. Resumen de la simulación para el tiempo de retorno de 100 años



Fuente: Elaboración propia

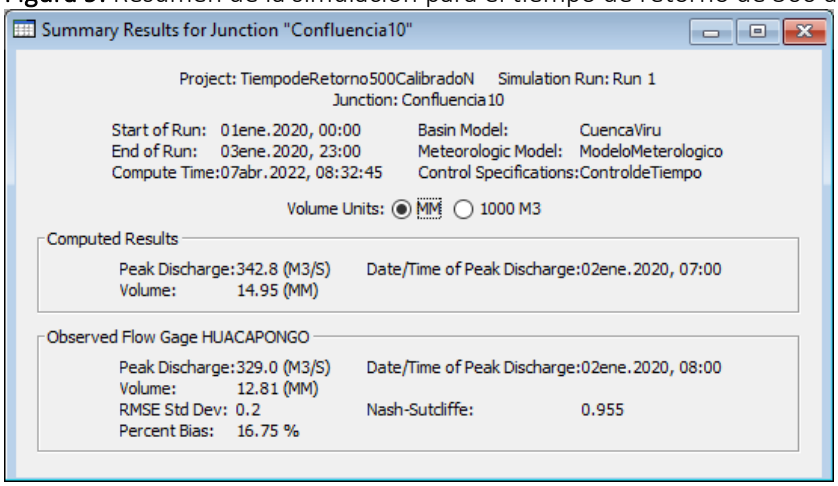
De igual manera sucedió con la simulación para el caudal de 500 años de periodo de retorno, el coeficiente de Nash-Sutcliffe es muy cercano a 1, por lo que se muestra su alto nivel de compatibilidad entre los valores simulados y el resultado a partir de los observados provenientes de la estación hidrométrica.

Figura 8. Hidrograma de descarga de la cuenca para tiempo de retorno de 500 años



Fuente: Elaboración propia

Figura 9. Resumen de la simulación para el tiempo de retorno de 500 años



Fuente: Elaboración propia

Del modelo hidráulico

Con el caudal de 100 años de período de retorno, se calculó el comportamiento del agua en las secciones en el modelo hidráulico ingresado en el programa HEC-RAS. Entre los resultados, se encuentra la cota que alcanzó el nivel del agua que, junto con las cotas ingresadas de la sección donde se encuentra el puente y las cotas del puente, se pudo calcular el gálibo y NAME como se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6. Resultado obtenido para el gálibo y el NAME

Elevación de la parte inferior del puente	Elevación Mínima del canal	Elevación de la Superficie del agua	Gálibo (m)	NAME (m)
50.00	46.07	47.67	2.33	1.6

Fuente: Elaboración propia

Seguidamente, con el caudal de 500 años de periodo de retorno, se calculó la socavación. Primero se calculó la socavación general por contracción por el método de Litschvan Levediev. En las siguientes tablas se muestra los resultados de las variables de los cálculos intermedios obtenidos por este método y finalmente la profundidad obtenida:

Tabla 7. Cálculo del coeficiente de contracción μ

Velocidad media (m/s)	Luz Libre (m)	Coef. de contracción μ
4.24	15	0.9

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Cálculo del ancho efectivo

Ancho (m)	Distamcia mínima (m)	Ancho efectivo (m)
54.8	2	50.8

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Cálculo del coeficiente de sección α

Ancho efectivo (m)	Altura media (m)	Caudal de diseño (m3/s)	Coef. de sección α
50.80	1.72	342.80	2.73

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Cálculo de la profundidad de socavación

Coef. de contracción μ	Coef. de sección α	Tirante antes de erosión (m)	Coef. β	Exponente x	Dm (mm)	Hs (m)
0.90	2.73	1.91	1.06	0.28	41.81	3.16

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Cálculo de la profundidad de socavación respecto al fondo del cauce

Profunidad de socavación Hs (m)	Tirante antes de la erosión Ho (m)	Profundidad de socavación respecto al fondo del cauce (m)
3.16	1.91	1.25

Fuente: Elaboración propia

Utilizando el programa HEC-RAS, como primer resultado, con el fin de comparar con el valor de socavación obtenido por el método de Litschvan Levediev, se calculó la socavación general por contracción y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 12. Resultados de socavación por contracción

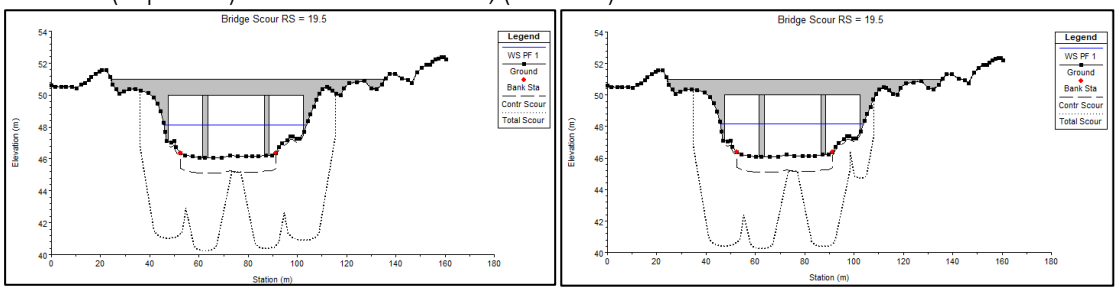
Socav. Contracción	Ys(m)
Izquierda	0.29
Centro	0.98
Derecha	0.21

Fuente: Elaboración propia

En los resultados que proporciona el programa HEC-RAS, además de calcular la socavación general y la local, también suma ambos efectos y nos muestra la socavación total. Esta socavación total por un lado suma la socavación general y la socavación local en pilares y por otro, la socavación general y la socavación local en estribos. No obstante, el resultado gráfico, que muestra el programa como parte de los resultados, junta los tres efectos.

Como primer grupo de combinaciones se eligió para socavación local en pilares el método de CSU, y se cambió la socavación local en estribos entre el método de Froehlich y método de Hire, obteniendo las siguientes gráficas:

Figura 10. Gráfico de la combinación método de CSU para socavación en pilares y para socavación en estribos: (izquierda) método de Froehlich, (derecha) método de Hire



Fuente: Elaboración propia

En la simulación de la socavación local para los pilares, el programa HEC-RAS, ofrece poder cambiar la forma del pilar. Para esta investigación, se eligió realizar pruebas solo variando la cara que hace contacto con el flujo del cauce: nariz cuadrada, nariz redonda y nariz puntiaguda. En el caso particular de la socavación local en pilares al utilizar el método de CSU, los valores de profundidad de socavación no cambiaron, a pesar que su factor de forma, como se muestra a continuación es distinto.

Tabla 13. Resultados de socavación local en pilares para las 3 formas de pilares elegidas

Forma del pilar	K1	Ys(m)
Nariz cuadrada	1.1	4.86
Nariz redonda	1.0	4.86
Nariz puntiaguda	0.9	4.86

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los resultados en la socavación local en estribos, los resultados obtenidos por el método de Froehlich son los siguientes:

Tabla 14. Resultados de socavación local en los estribos por método de Froehlich

Socav. Estribos	Ys(m)
Izquierda	5.77
Derecha	6.54

Fuente: Elaboración propia

Y los resultados por el método de Hire son los siguientes:

Tabla 15. Resultados de socavación local en los estribos por método de Hire

Socav. Estribos	Ys(m)
Izquierda	6.39
Derecha	2.71

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos en cada uno de los tipos de socavación son independientes de cuál sea la combinación que se esté usando, es de esta manera que, para las siguientes combinaciones, al cambiar al método de Froehlich para la socavación local en pilares, los resultados de los dos métodos para la socavación local en estribos no variaron.

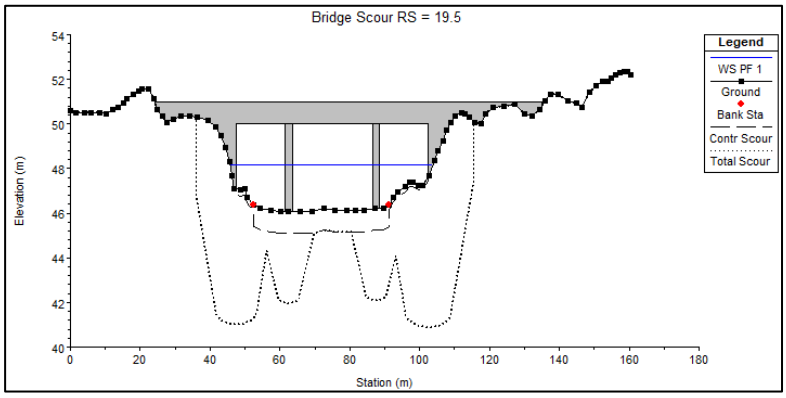
Utilizando el método de Froehlich para la socavación local en pilares, la primera forma para los pilares que se utilizó fue de nariz cuadrada, obteniendo el siguiente resultado y gráfico:

Tabla 16. Resultados de socavación local en los pilares por método de Froehlich y nariz cuadrada

Socav. Pilares	Ys(m)
Todos los pilares	3.13

Fuente: Elaboración propia

Figura 11. Gráfico de la combinación considerando la socavación local de pilares de nariz cuadrada en el método de Froehlich



Fuente: Elaboración propia

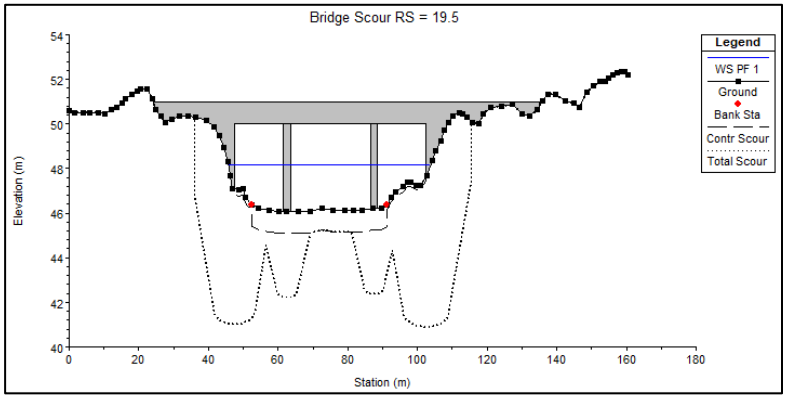
La segunda forma fue de nariz redonda, obteniendo el siguiente resultado y gráfico:

Tabla 17. Resultados de socavación local en los pilares por método de Froehlich y nariz redonda

Socav. Pilares	Ys(m)
Todos los pilares	2.87

Fuente: Elaboración propia

Figura 12. Gráfico de la combinación considerando la socavación local de pilares de nariz redonda en el método de Froehlich



Fuente: Elaboración propia

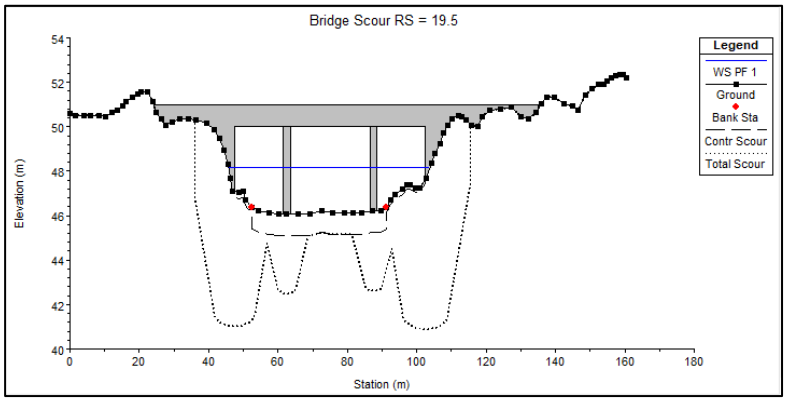
Y la tercera forma fue de nariz puntiaguda, obteniendo el siguiente resultado y gráfico:

Tabla 18. Resultados de socavación local en los pilares por método de Froehlich y nariz puntiaguda

Socav. Pilares	Ys(m)
Todos los pilares	2.61

Fuente: Elaboración propia

Figura 13. Gráfico de la combinación considerando la socavación local de pilares de nariz puntiaguda en el método de Froehlich



Fuente: Elaboración propia

Respecto a los valores de socavación total, de la combinación entre socavación general por contracción y socavación local en pilares por el método de CSU se consiguió el siguiente resultado:

Tabla 19. Combinación de la profundidad de socavación general por contracción y local en pilares

Combinación	Ys(m)
Soca. Gen. Contrac. + Socav. Pilares	5.84

Fuente: Elaboración propia

Cuando se utilizó el método de Froehlich, como se mencionó, en este método al cambiar la geometría del pilar, dio resultados distintos. Para el primer caso, eligiendo la nariz cuadrada, se obtuvo el siguiente resultado para la socavación total:

Tabla 20. Combinación de la profundidad de socavación por contracción y local en pilares

Combinación	Ys(m)
Soca. Gen. Contrac. + Socav. Pilares	4.11

Fuente: Elaboración propia

Para el caso de la nariz redonda, se obtuvo el siguiente resultado:

Tabla 21. Combinación de la profundidad de socavación general por contracción y local en pilares

Combinación	Ys(m)
Soca. Gen. Contrac. + Socav. Pilares	3.85

Fuente: Elaboración propia

Y para el caso de la nariz puntiaguda, el resultado fue el siguiente:

Tabla 22. Combinación de la profundidad de socavación general por contracción y local en pilares

Combinación	Ys(m)
Soca. Gen. Contrac. + Socav. Pilares	3.59

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, en cuanto a la socavación total esta vez considerando la socavación local en estribos, por medio del método de Froehlich, se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 23. Combinación de la profundidad de socavación general por contracción y local en estribos

Combinación	Ys(m)
Soca. Gen. Contrac.+ Socav. Estribos Izq	6.05
Soca. Gen. Contrac. + Socav. Estribos Der	6.75

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al usar el método de Hire, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 24. Combinación de la profundidad de socavación general por contracción y local en estribos

Combinación	Ys(m)
Soca. Gen. Contrac. + Socav. Estribos Izq	6.68
Soca. Gen. Contrac. + Socav. Estribos Der	2.91

Fuente: Elaboración propia

DISCUSIÓN

Del modelo hidrológico

En los resultados de 50 años de periodo de retorno, usado para realizar la calibración de los datos observados, se obtuvo un coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0.983, lo que muestra un alto grado de compatibilidad en la optimización entre los datos simulados y observados. Esta relación también se puede ver en los resultados del volumen y flujo pico. En el primero se diferencian en un 2.44 % del mayor, mientras que en el segundo la diferencia es de 6.97% del valor observado.

Respecto a los resultados de 100 años de periodo de retorno, la descarga pico fue mayor de los valores de la estación Huacapongo siendo igual a 250 m3/s, mientras que de los valores de las estaciones pluviométricas el valor fue de 242 m3/s. En el caso del volumen, el mayor valor fue de las estaciones pluviométricas siendo igual a 10.56 mm, mientras que la de la estación Huacapongo fue de 9.73 mm.

Realizando la misma comparación, ahora con los resultados de 500 años de periodo de retorno, se obtiene que tanto la descarga pico como el volumen son mayores los valores de las estaciones pluviométricas, con resultados de 342.8 m^3/s y 14.95 mm, respectivamente, mientras que los valores de la estación Huacapongo son igual a 329 m^3/s y 12.81 mm.

Del modelo Hidráulico

Haciendo uso del caudal calculado para 100 años de periodo de retorno, las dimensiones del puente modelado, y las cotas calculadas después de haber corrido la simulación, se obtuvo el gálibo igual a 2.33 m, el cual se calculó de la diferencia de la elevación de la parte inferior del puente y la elevación de la superficie del agua, y el NAME igual a 1.60 m, el cual se calculó de la diferencia de la elevación mínima del canal y la elevación de la superficie del agua.

En cuanto a la socavación general por contracción, se obtuvieron dos resultados a comparar: por medio del método de Litschvan Levediev, calculado a mano usando el programa Excel y el método de Laursen, que es el método por el cual el programa HEC-RAS hace los cálculos para este fenómeno. Para el método de Litschvan Levediev, el valor que se obtuvo fue de 1.25 m. Respecto a lo obtenido por el programa HEC-RAS, este nos proporciona la socavación en 3 ubicaciones: izquierda, centro y derecha. En comparación, tanto la izquierda como la derecha, que resultaron 0.29 y 0.21, respectivamente, son mucho menores a la del centro, que es igual a 0.98. Considerando la más alta y comparándola con la obtenida por el método de Litschvan Levediev y luego de hacer el redondeo a cada una, la diferencia entre ambas es de 0.30 m.

Respecto a la socavación local localizada en los pilares, además de evaluar por los dos métodos que permite el programa HEC-RAS, en cada uno de estos se cambió la forma de la cara que tiene una interacción perpendicular con el flujo del cauce. Las formas que se eligieron fueron nariz cuadrada, nariz redonda y nariz puntiaguda. En el caso del método CSU, a pesar que cada forma tiene un factor de forma distinto, la profundidad de socavación local resultante fue el mismo para las tres formas, siendo igual a 4.86 m. Al utilizar el método de Froehlich, la forma en que se presentó una mayor socavación fue la de nariz cuadrada, con un valor de 3.13 m, seguido por la nariz redonda con 2.87 m y finalmente la forma con menor socavación fue la nariz puntiaguda con 2.61 m.

Respecto a la socavación local en los estribos, de los dos métodos utilizados que fueron Froehlich y Hire, el primero es el que mostró una mayor semejanza entre el lado izquierdo y derecho, siendo estos 5.77

m y 6.54 m. En cuanto al método de Hire, sus lados tuvieron una mayor diferencia, siendo para el izquierdo 6.39 m y el derecho 2.71 m.

CONCLUSIONES

El programa HEC-HMS ofrece la posibilidad de poder usar varios métodos de acuerdo a los datos que se tengan disponibles para el cálculo de una misma variable como la escorrentía directa y pérdidas o abstracciones.

Por medio de las optimizaciones considerando diferentes condiciones del Número de Curva relacionadas con el porcentaje de humedad, se puede afirmar que es un factor que no se puede pasar por alto para obtener un adecuado resultado de la calibración.

En general, los valores máximos obtenidos en las tres condiciones han sido altos, lo que significa que en los tres casos se tiene un alto grado de coincidencia entre lo obtenido de los simulado y lo obtenido de lo observado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AgriMetSoft. (2019). *Nash Sutcliffe model Efficiency coefficient*. Obtenido de: https://agrimetsoft.com/calculators/Nash%20Sutcliffe%20model%20Efficiency%20coefficient

Basile, P. A. (2018). *Transporte de Sedimentos y Morfodinámica de Ríos Aluviales.* Rosario: UNR EDITORA.

Chow, V. (1994). *Hidrología Aplicada.* Santafé de Bogota: McGraw-Hill Interamericana S.A.

Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (1984). *Mecánica de Suelos: Flujo de Agua en Suelos* (Vol. III). Ciudad de México: Limusa.

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2014). *Manual de hidrología, hidráulica y drenaje.* Obtenido de http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_2950.pdf

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). *Manual de Puentes.* Obtenido de https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/MANUAL%20DE%20PUENTES%20PDF.pdf

Ochoa Rubio, T. (2017). *Hidrología Hidraúlica y Socavación en Puentes.* Bogotá: ECOE EDICIONES.

Pascual Aguilar, J. A., & Díaz Martín, M. (2016). *Guía práctica sobre la modelización hidrológica y el modelo HEC-HMS.* Alcalá de Henares.

U.S. Department of Transportation. (2012). *HEC-18. Evaluating Scour at Bridges.* Federal Hightway Administration, Virginia.

US Army Corps of Engineers. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual.* Obtenido de https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical%20Reference%20Manual_(CPD-74B).pdf

US Army Corps of Engineers. (2016). *HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual version 5.0.* Obtenido de https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf