



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



Metodología de análisis forense de puentes colapsados por causas hidráulicas

POR

Roberto Andrés Sáez Gatica

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título de Ingeniero Civil

Profesor Guía
Dr. Oscar Link Lazo

Noviembre 2022
Concepción (Chile)
© 2022 Roberto Andrés Sáez Gatica

© 2022 Roberto Andrés Sáez Gatica

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia y a mis amigos cercanos, por su ayuda incondicional durante todos estos años.

Agradezco a mi profesor guía, Dr. Oscar Link, y a mi profesor de comisión, Dr. Rodrigo Silva, por su ayuda y retroalimentación durante este trabajo, pudiendo así concretar finalmente el documento y dar por finalizada mi etapa universitaria en esta bonita y excelente carrera.

RESUMEN

El colapso de un puente por causas hidráulicas ocurre cuando se excede la cota de aguas máximas por sobre la revancha determinada, o bien, cuando se excede la profundidad de socavación total. La primera situación se presenta para crecidas mayores a la crecida de diseño. Sin embargo, la segunda situación no se presenta necesariamente para crecidas mayores a la crecida de diseño. En efecto, el desarrollo progresivo de la socavación puede derivar en el colapso de un puente simultáneamente ante un evento de crecida menor. En este caso, determinar la causa de colapso del puente requiere análisis forense. El análisis forense no se rige por normativas oficiales, sin embargo, en la práctica, se aplican procedimientos rigurosos, identificados a partir de casos de estudio de literatura de ingeniería forense. El presente documento, tiene por objetivo general establecer una metodología de análisis forense de puentes colapsados por causas hidráulicas.

Se propuso una metodología de análisis forense de puentes colapsados por causas hidráulicas considerando inspección *in situ*, evaluación de hidrograma, estimación de la cota de fondo, análisis de la estabilidad del cauce y verificación de la condición de diseño, a fin de validar (o descartar) la hipótesis de causas hidráulicas como la causa de colapso, señalar los factores relacionados que contribuyeron a una condición por sobre la de diseño y establecer el diagnóstico forense.

Se analizaron comparativamente casos de estudio de puentes colapsados por causas hidráulicas en Estados Unidos, Nueva Zelanda y Taiwán, en función de la metodología propuesta. En efecto, el procedimiento establecido por la metodología propuesta presentó un ajuste similar a los procedimientos establecidos en los casos de estudio.

La metodología de análisis forense de puentes colapsados por causas hidráulicas establecida en el presente documento requiere ser validada mediante aplicaciones que no se realizaron para este trabajo.

ABSTRACT

Bridge collapse due to hydraulic causes occurs when the maximum water level is exceeded, or it occurs when the total scour depth is exceeded. The first situation occurs under floods greater than the design flood. However, the second situation does not necessarily arise for flood events greater than the design flood. Indeed, the progressive development of scour can lead to the collapse of a bridge, simultaneously under a minor flood event. In this case, determining the cause of the bridge's collapse needs forensic analysis. Forensic analysis is not governed by official regulations, however, in practice, it is identified rigorous procedures applied from case studies of forensic engineering literature. The present document has the general objective of establishing a methodology for forensic analysis of bridges collapsed due to hydraulic causes.

A methodology for forensic analysis of bridge collapse due to hydraulic causes is proposed, considering on-site inspection, hydrograph evaluation, estimation of the bed bottom level, stream channel stability analysis and verification of the design condition, to validate (or rule out) the hypothesis of hydraulic causes as the cause of collapse, to point out the related factors that contributed to an above design condition and to establish the forensic diagnosis.

Case studies of collapsed bridges due to hydraulic causes in the United States, New Zealand and Taiwan were comparatively analyzed, based on the proposed methodology. Indeed, the procedure established by the proposed methodology presented a similar adjustment to the procedures established in the case studies.

The methodology for forensic analysis of bridge collapse due to hydraulic causes established in this document needs to be validated through applications that were not carried out for this work.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	10
1.1 Motivación.....	10
1.2 Objetivos.....	11
1.2.1 Objetivo general.....	11
1.2.2 Objetivos específicos.....	11
CAPÍTULO 2: REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE	12
2.1 Introducción.....	12
2.2 Ingeniería forense.....	12
2.2.1 Definición.....	12
2.2.2 Alcance.....	12
2.2.3 Puentes	13
2.3 Condición de diseño hidráulica de puentes.....	15
2.3.1 Descripción.....	15
2.3.2 Cota de aguas máximas.....	15
2.3.3 Socavación	17
2.4 Casos de estudio.....	21
2.4.1 Descripción.....	21
2.4.2 Análisis forense.....	22
2.5 Conclusiones.....	24
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS	25
3.1 Introducción.....	25
3.2 Metodología propuesta.....	25
3.2.1 Esquema	25
3.2.2 Inspección in situ.....	26

3.2.3 Hidrograma.....	29
3.2.4 Cota de fondo	31
3.2.5 Estabilidad del cauce.....	34
3.2.6 Condición de diseño hidráulica	35
3.2.7 Diagnóstico forense.....	37
3.3 Conclusiones	38
CAPÍTULO 4: RESULTADOS	39
4.1 Introducción.....	39
4.2 Metodología propuesta.....	39
4.2.1 Inspección in situ.....	39
4.2.2 Hidrograma.....	42
4.2.3 Cota de fondo	43
4.2.4 Estabilidad del cauce.....	44
4.2.5 Condición de diseño hidráulica	45
4.2.6 Diagnóstico forense.....	47
4.3 Conclusiones	48
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	49
5.1 Discusión.....	49
5.2 Conclusiones	49
CAPÍTULO 6: REFERENCIAS	50
CAPÍTULO 7: ANEXOS.....	55
7.1 ANEXO I. Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Casos de estudio: Descripción general.	21
Tabla 2.2. Casos de estudio: Descripción diseño estructural.	22
Tabla 2.3. Casos de estudio: Descripción áreas de estudio.	22
Tabla 3.1. Metodología propuesta: Hidrograma.....	30
Tabla 3.2. Metodología propuesta: Simulación de caudales.	32
Tabla 3.3. Metodología propuesta: Parámetros de entrada	35
Tabla 3.4. Metodología propuesta: Socavación y factores relacionados.....	36
Tabla 3.5. Metodología propuesta: Diagnóstico forense.....	37
Tabla 4.1. Casos de estudio: Inspección in situ.....	39
Tabla 4.2. Casos de estudio: Caudales peak de crecida.....	42
Tabla 4.3. Casos de estudio: Cota de fondo.	43
Tabla 4.4. Casos de estudio: Estabilidad del cauce.	44
Tabla 4.5. Casos de estudio: Socavación y factores relacionados.....	45
Tabla 4.6. Casos de estudio: Verificación para condición de diseño.	46
Tabla 4.7. Casos de estudio: Diagnóstico forense.	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Clasificación causas de colapso de puentes.	14
Figura 2.2. Esquema: Condición de diseño hidráulica de un puente.....	15
Figura 2.3. Esquema: Coronamiento de un puente.....	15
Figura 2.4. Fotografías de puentes colapsados por coronamiento.....	16
Figura 2.5. Esquema: Socavación en la cepa de un puente.	17
Figura 2.6. Fotografías de puentes en presencia de escombros flotantes acumulados en las cepas.	18
Figura 2.7. Fotografías de puentes colapsados por socavación.....	20
Figura 3.1. Metodología propuesta.....	25
Figura 3.2. Inspección in situ.....	26
Figura 3.3. Esquema: Batimetría.....	27
Figura 3.4. Esquema: Muestreo de suelo.....	27
Figura 3.5. Esquema: Gráfico para la obtención del factor de escombros propuesto por Ebrahimi et al. (2020).....	28
Figura 3.6. Esquema: Hidrograma.....	29
Figura 3.7. Esquema: a) Batimetrías históricas en la sección transversal de escurrimiento; b) Batimetrías históricas en planta.....	31
Figura 3.8. Esquema: Cota de fondo para períodos de retorno típicos.....	33
Figura 3.9. Esquema: Migración (en planta) del cauce.	34
Figura 3.10. Esquema: Socavación total.	36

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Los puentes corresponden a obras de infraestructura clave para la conectividad vial y ferroviaria, cumplen el rol de otorgar la continuidad de las vías y permiten el funcionamiento del sistema de transporte, indispensable para el crecimiento socioeconómico del país.

Uno de los mayores problemas a nivel global que presentan los puentes es el colapso dentro de su vida útil, resultando un alto costo económico en reparaciones, la interrupción provisoria del comercio, y eventualmente, en pérdidas de vidas humanas.

La importante cantidad de colapsos de puentes dentro de su vida útil (Cau et al., 2003; Imam & Chryssanthopoulos, 2012; Cook et al., 2014; Xu et al., 2016; Ede et al., 2019; Tan et al., 2020; Garg et al., 2020), y debido a su rol como obras de infraestructura clave para la conectividad, motivan una especialidad importante dentro de la ingeniería forense, dedicada al análisis del colapso de puentes.

El análisis forense de puentes a nivel global ha clasificado las causas de colapso principalmente en cinco categorías; 1) colisiones, impacto de barcos y vehículos contra la estructura; 2) estructurales, deterioro por fatiga y corrosión; 3) hidráulicas, coronamiento y socavación principalmente durante crecidas, incluyendo arrastre de escombros flotantes; 4) sobrepeso vehicular; 5) otras, como deslizamientos de tierra, explosiones, incendios y terremotos (Harik et al., 1990; Deng et al., 2015; Xu et al., 2019; Garg et al., 2020; Tan et al., 2020). Adicionalmente, a las causas de colapso de puentes contribuyen con frecuencia errores de diseño, constructivos y falta de mantenimiento dentro de su vida útil (Hai et al., 2007).

Las causas hidraulicas en el colapso de puentes predominan por sobre las demás. Particularmente, la socavación corresponde a la principal causa de colapso de puentes en todo el mundo (Smith, 1976; Kattell & Eriksson, 1998; Wardhana & Hadipriono, 2003; Briaud et al., 2007; Benn, 2013; Cook et al., 2014; Wirkijowski & Moon, 2020).

En la actualidad, se dispone de casos de estudio de puentes colapsados por causas hidráulicas en Estados Unidos (Storey & Delatte, 2003; Lin et al., 2014), Nueva Zelanda (Melville & Coleman, 2000; Melville & Coleman, 2001) y Taiwán (Ko et al., 2014; Wang et al., 2014; Wu et al., 2014). Particularmente, el análisis forense no se rige por normativas oficiales, sin embargo, en la práctica, se aplican procedimientos rigurosos, identificados a partir de los casos de estudio de literatura de ingeniería forense.

El presente documento, tiene por objetivo general establecer una metodología de análisis forense de puentes colapsados por causas hidráulicas. Cabe señalar, la metodología de análisis forense de puentes colapsados por causas hidráulicas establecida en el presente documento requiere ser validada mediante aplicaciones que no se realizaron para este trabajo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Establecer una metodología de análisis forense de puentes colapsados por causas hidráulicas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Proponer una metodología.
- Analizar comparativamente casos de estudio seleccionados en función de la metodología propuesta.

CAPÍTULO 2: REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

Este capítulo presenta la revisión del estado del arte de la ingeniería forense, condición de diseño hidráulica de puentes y casos de estudio de análisis forense.

2.2 Ingeniería forense

2.2.1 Definición

La ingeniería forense se define como la aplicación de principios ingenieriles y conocimiento técnico para determinar las causas de falla y problemas de serviciabilidad en estructuras, maquinaria, vehículos y productos de manufactura, con el propósito de facilitar el diseño de las reparaciones adecuadas prolongando la vida útil, evitar incurrir nuevamente en los errores adjudicados y atribuir la responsabilidad a las partes involucradas. Además, es labor de un ingeniero forense entregar el testimonio de los hallazgos ante una corte judicial u otra convocación legal cuando sea requerida (Lewis, 2003).

2.2.2 Alcance

La ingeniería forense comenzó a tomar mayor importancia a partir de una serie de eventos catastróficos ocurridos en Estados Unidos durante la década de 1970, incluyendo una importante cantidad de fallas estructurales de obras civiles y pérdidas de vidas humanas (Carper, 2003; Delatte & Carper, 2010). En consecuencia, y debido a la alarma pública, en 1985 la ASCE (American Society of Civil Engineers), estableció formalmente el TCFE (Technical Council on Forensic Engineering), y en 2003 publicaron su primera edición de ingeniería forense. Actualmente, el TCFE continúa actualizando las ediciones de ingeniería forense mediante el anexo de los hallazgos encontrados a partir de nuevas investigaciones, en orden de ir actualizando conjuntamente las normativas de construcción y seguridad, los códigos de diseño y especificaciones técnicas, con la finalidad de mitigar la cantidad de fallas estructurales en obras civiles futuras, junto con el alto impacto socioeconómico que supone (Kardon, 2012; Barrow et al., 2018).

2.2.3 Puentes

El concepto técnico de falla de un puente se clasifica según el colapso parcial o total de la estructura (NYSDOT, 2004). El colapso parcial de un puente corresponde a una estructura en las que todos o algunos de los elementos principales de uno o varios tramos han sufrido una deformación severa de manera tal que las vidas de quienes transitan por sobre o debajo de la estructura podrían estar en peligro. El colapso total de un puente corresponde a una estructura en las que todos los elementos principales de uno o varios tramos han sufrido una deformación severa de manera tal que las vías no son transitables. Por lo tanto, el colapso parcial de un puente puede no resultar necesariamente catastrófico, sin embargo, el colapso total resulta en un alto costo económico en reparaciones, la interrupción provisoria del comercio, y eventualmente, en pérdidas de vidas humanas. En adelante, se emplea únicamente el concepto técnico de colapso para referir la falla de un puente.

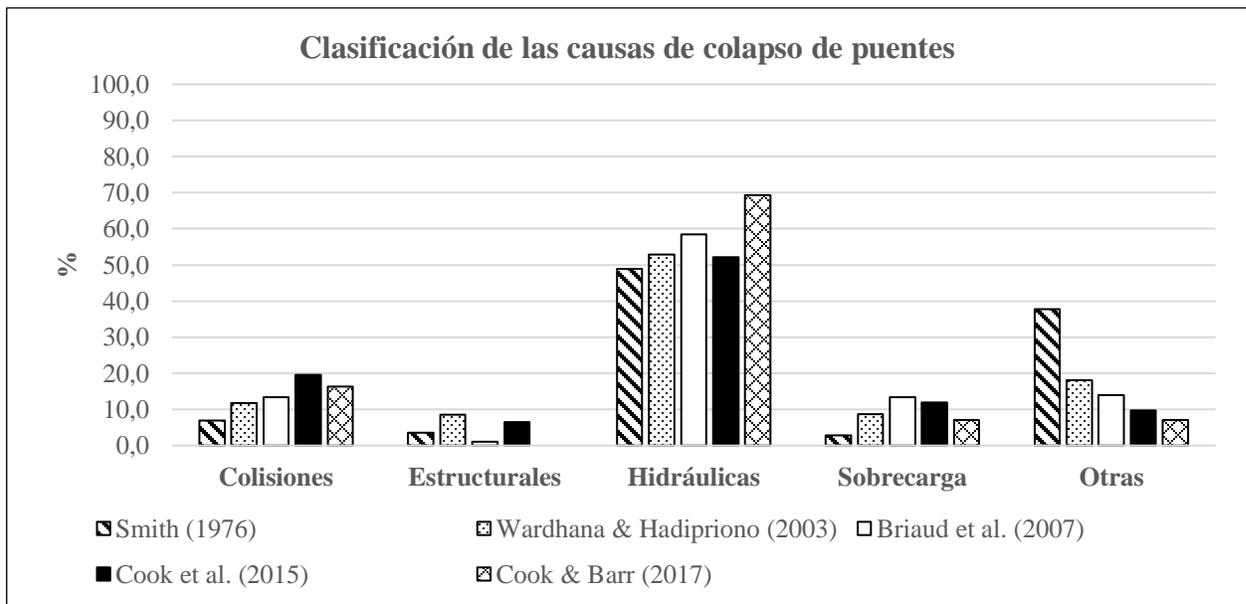
La importante cantidad de colapsos de puentes dentro de su vida útil (Cau et al., 2003; Imam & Chryssanthopoulos, 2012; Cook et al., 2014; Xu et al., 2016; Ede et al., 2019; Tan et al., 2020; Garg et al., 2020), y debido a su rol como obras de infraestructura clave para la conectividad, motivan una especialidad importante dentro de la ingeniería forense, dedicada al análisis del colapso de puentes. Particularmente, en Estados Unidos, la infraestructura cuenta con casi 600.000 puentes y la tasa media anual de colapso estimada es de 1/4.700, oscilando entre 1/6.900 y 1/2.700, i.e. una media de 128 puentes colapsados por año, oscilando entre 87 y 222 (Cook et al., 2014). En Chile, la infraestructura cuenta con casi 12.000 puentes (MOP, 2020), sin embargo, el escaso catastro a nivel local no permite estimar la tasa media anual de colapso de puentes. Por lo tanto, aplicando la tasa media anual de colapso estimada por Cook et al. (2014), supone entre 3 y 4 puentes colapsados por año.

El análisis forense de puentes a nivel global ha clasificado las causas de colapso principalmente en cinco categorías; 1) colisiones, impacto de barcos y vehículos contra la estructura; 2) estructurales, deterioro por fatiga y corrosión; 3) hidráulicas, coronamiento y socavación principalmente durante crecidas, incluyendo arrastre de escombros flotantes; 4) sobrepeso vehicular; 5) otras, como deslizamientos de tierra, explosiones, incendios y terremotos (Harik et al., 1990; Deng et al., 2015; Xu et al., 2019; Garg et al., 2020; Tan et al., 2020). Adicionalmente, a las causas de colapso de puentes contribuyen con frecuencia errores de diseño, constructivos y falta de mantenimiento dentro de su vida útil (Hai et al., 2007). El análisis forense de puentes cumple con anexar los

hallazgos encontrados para evitar incurrir nuevamente en los errores adjudicados y atribuir la responsabilidad a las partes involucradas, y finalmente, conjuntamente al análisis estructural, geotécnico y de transporte, proponer el diseño para las reparaciones adecuadas.

La Figura 2.1 presenta la clasificación de las causas de colapso de puentes estudiadas por Smith (1976), Wardhana y Hadipriono (2003), Briaud et al. (2007), Cook et al. (2015) y Cook y Barr (2017).

Figura 2.1. Clasificación causas de colapso de puentes.



Fuente: Smith (1976), Wardhana y Hadipriono (2003), Briaud et al. (2007), Cook et al. (2015) y Cook y Barr (2017).

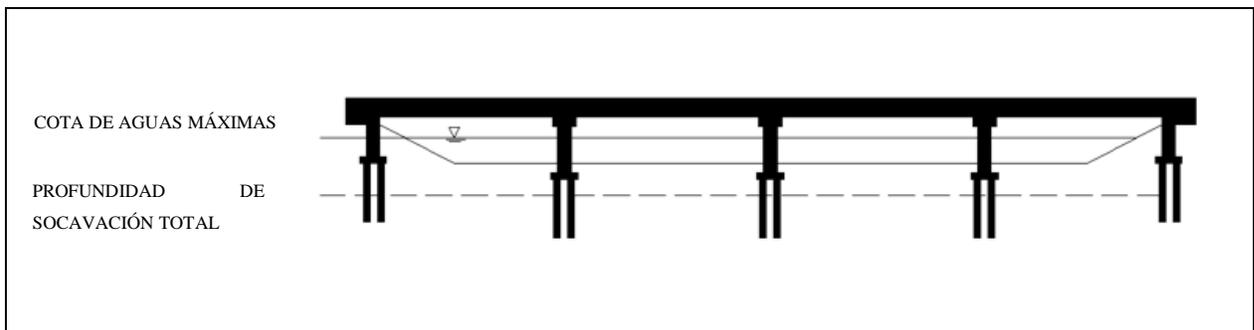
De la Figura 2.1, las causas hidráulicas en el colapso de puentes predominan por sobre las demás. Particularmente, la socavación corresponde a la principal causa de colapso de puentes en todo el mundo (Smith, 1976; Kattell & Eriksson, 1998; Wardhana & Hadipriono, 2003; Briaud et al., 2007; Benn, 2013; Cook et al., 2014; Wirkijowski & Moon, 2020), implicando una importante cantidad de colapsos de puentes emplazados en cauces naturales, dirigiendo el enfoque del presente documento. En adelante, se refiere únicamente al concepto técnico de puente para referir a los puentes emplazados en cauces naturales. Cabe señalar, las causas hidráulicas de colapso de puentes implican haber excedido la condición de diseño hidráulica. Entonces, a continuación se revisa la condición de diseño hidráulica de puentes.

2.3 Condición de diseño hidráulica de puentes

2.3.1 Descripción

La condición de diseño hidráulica de puentes consiste fundamentalmente en la determinación de la cota de aguas máximas y la profundidad de socavación total, en función de un caudal peak de crecida asociado a un período de retorno determinado (AASHTO, 2020). La Figura 2.2 presenta un esquema tipo de la condición de diseño hidráulica de un puente.

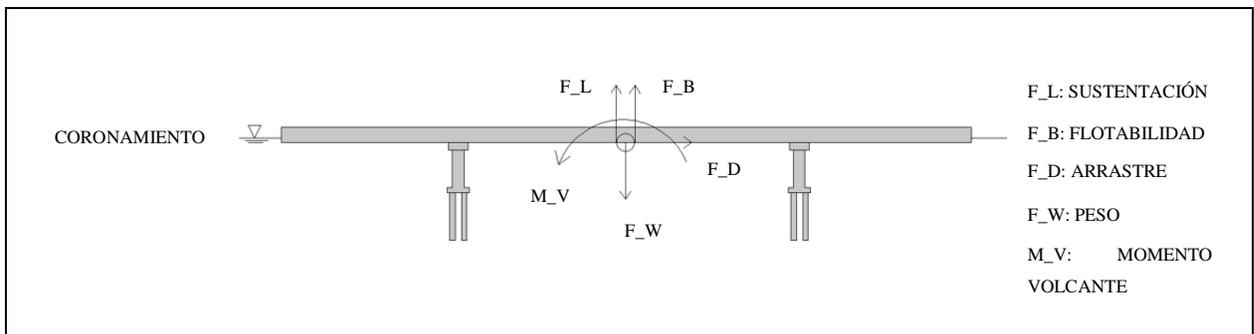
Figura 2.2. Esquema: Condición de diseño hidráulica de un puente.



2.3.2 Cota de aguas máximas

La condición de diseño hidráulica para la cota de aguas incluye una distancia vertical hasta la cota inferior de la superestructura, conocida como revancha. Cuando la revancha es excedida, el puente colapsa por coronamiento. El coronamiento de puentes está estudiado principalmente mediante modelación física para superestructuras parcial y completamente sumergidas (Cigada et al., 2001; Malasavi et al., 2001; Robertson et al., 2007; Kerényi et al., 2009; Oudenbroek et al., 2018). La Figura 2.3 presenta un esquema tipo del coronamiento de un puente.

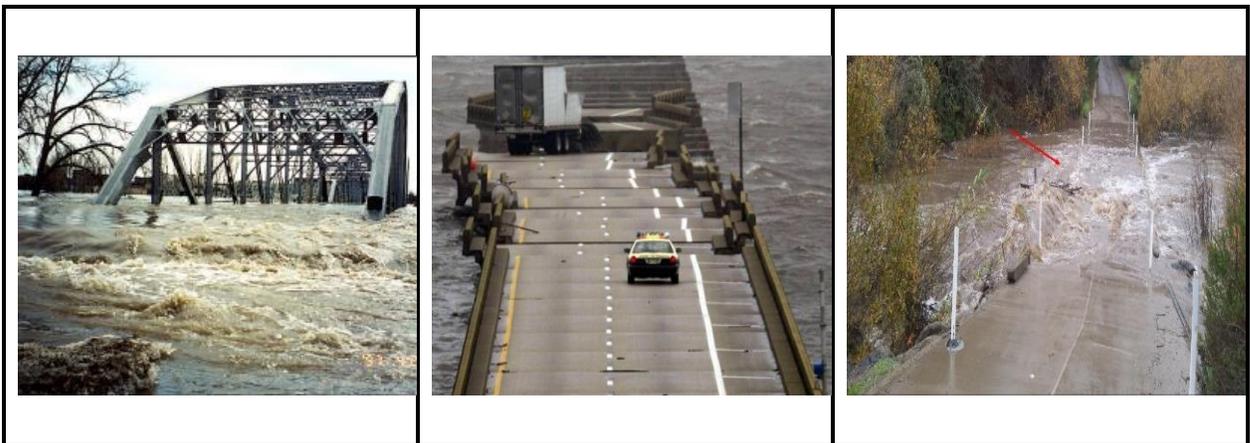
Figura 2.3. Esquema: Coronamiento de un puente.



De la Figura 2.3, la flotabilidad corresponde a la fuerza de empuje ascendente ejercida sobre la estructura en función de su peso, el arrastre y la sustentación corresponden a las fuerzas hidrodinámicas ejercidas sobre la estructura en función de la profundidad, velocidad del flujo y un coeficiente de resistencia variable según la geometría de la estructura y número de Reynolds. El desequilibrio de fuerzas entre el peso de la superestructura y la combinación simultánea de flotabilidad, sustentación y arrastre resulta en el momento volcante y colapso de la estructura.

La Figura 2.4 presenta fotografías de puentes colapsados por coronamiento. Las fotografías fueron extraídas de USGS (1997), Getty Images (2004), Morro Bay National Estuary Program (2019).

Figura 2.4. Fotografías de puentes colapsados por coronamiento.



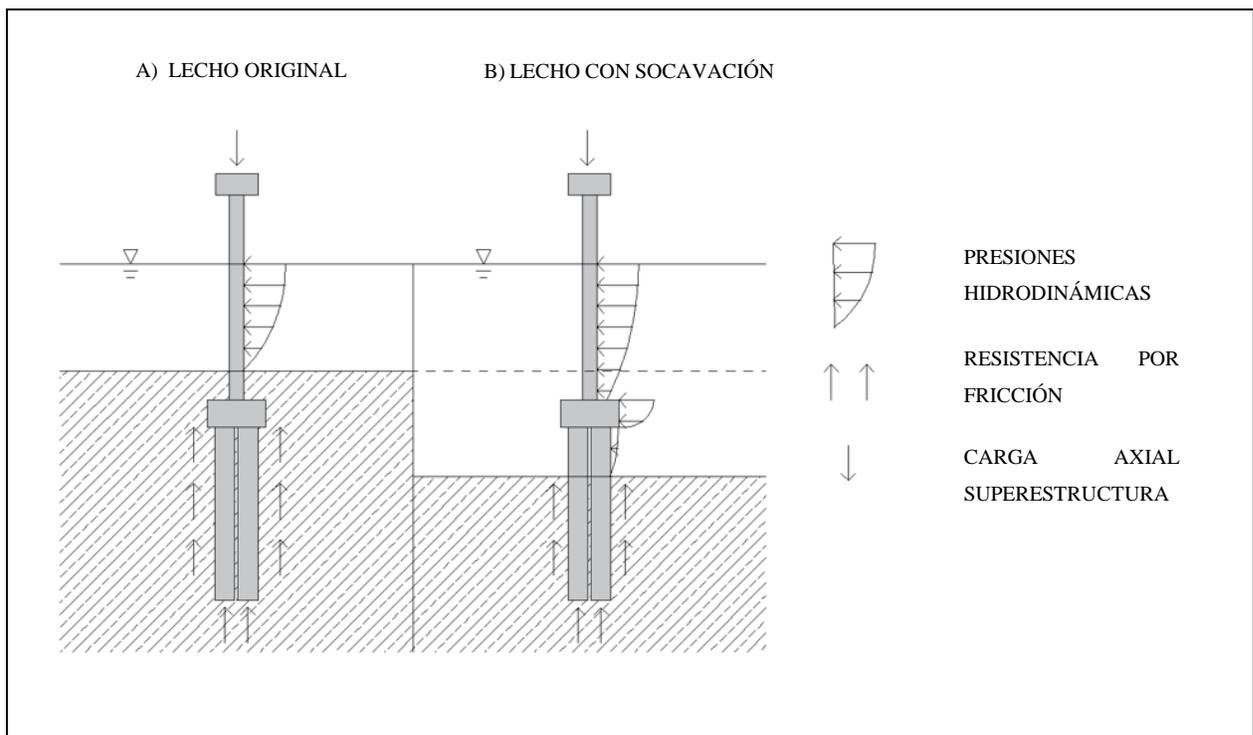
Fuente: USGS (1997), Getty Images (2004), Morro Bay Estuary Program (2019).

De la Figura 2.4, el colapso de un puente por coronamiento se presenta ante caudales peak de crecida asociados a períodos de retorno por sobre la condición de diseño. En efecto, el coronamiento de puentes se presenta ante eventos de precipitación extraordinarios, derivando en crecidas importantes y eventualmente, en desbordamientos del cauce. De este modo, determinar la causa de colapso de un puente por coronamiento no requiere análisis forense.

2.3.3 Socavación

La condición de diseño hidráulica para la profundidad de socavación total incluye la superposición de socavación general, por contracción y local; socavación general, descenso del lecho independiente de la presencia del puente; socavación por contracción, descenso del lecho por la aceleración del flujo inducida con el angostamiento del cauce desde aguas arriba; socavación local, descenso del lecho circundante de las cepas y de los estribos, por los vórtices de herradura generados con la interceptación del flujo y la estructura. La socavación de puentes está estudiada principalmente mediante mediciones *in situ* y modelación física, derivando una gran cantidad de fórmulas de origen semi-empírico (Richardson & Davis, 2001), adoptando un criterio conservador para la estimación de la profundidad de socavación total, i.e. considerando una condición de transporte incipiente (o crítico) de los sedimentos. La Figura 2.5 presenta un esquema tipo de socavación en la cepa de un puente.

Figura 2.5. Esquema: Socavación en la cepa de un puente.



De la Figura 2.5, el descenso del lecho circundante de las fundaciones disminuye la resistencia por fricción, resultando comúnmente en el asentamiento, o bien, en el pandeo de los pilotes, por el peso propio ejercido de la superestructura.

La socavación de puentes se desarrolla en diferentes escalas de tiempo; súbitamente, en escalas de tiempo del orden de un hidrograma; gradualmente, en escalas de tiempo prolongadas del orden de años y hasta décadas.

En escalas de tiempo del orden de un hidrograma de crecida, la socavación se desarrolla por el incremento del caudal, prácticamente hasta el peak de crecida. Eventualmente, las crecidas incluyen el arrastre de escombros flotantes desde aguas arriba, i.e., restos de vegetación provenientes desde las planicies de inundación por la erosión lateral del cauce principal, susceptibles a interceptar las cepas de los puentes, induciendo la contracción de la sección transversal de escurrimiento y la socavación local alrededor de las cepas por el incremento del diámetro equivalente. La Figura 2.6 presenta fotografías *in situ* de escombros flotantes acumulados en las cepas de puentes. Las fotografías fueron extraídas de Diehl (1990).

Figura 2.6. Fotografías de puentes en presencia de escombros flotantes acumulados en las cepas.



Fuente: Diehl (1990).

De la Figura 2.6, el efecto de la acumulación de escombros flotantes en la socavación local está estudiado mediante modelación física, derivando en la obtención de un factor adicional a la superposición del diámetro equivalente de las cepas (Laursen & Toch, 1956; Melville & Dongol, 1992; Lagasse et al., 2010; Ebrahimi et al., 2020).

En escalas de tiempo prolongadas, la socavación de puentes se desarrolla por el incremento de la pendiente de fondo tendiendo hacia un régimen de flujo uniforme (o normal), i.e. pendiente de fondo, pendiente del eje hidráulico y pendiente friccional paralelas. La variación de la pendiente de fondo está condicionada por la variación del caudal (líquido), caudal sólido y diámetro medio de los sedimentos, descrito analíticamente en función de la balanza de Lane (1955), incluyendo la migración (en planta) del cauce, i.e. el desplazamiento de los meandros aguas abajo con la erosión y deposición lateral de los sedimentos. La migración del cauce es principalmente importante cuando intercepta el sitio de emplazamiento de un puente constituido por cepas de muro lleno y cimentado sobre vigas de fundación, en este caso, la geometría de la estructura no es uniforme y la interceptación del flujo en dirección oblicua incrementa considerablemente el ángulo de ataque y el diámetro equivalente de las cepas, induciendo mayor socavación (Ettema et al., 1998; Ead et al., 2007; Yang et al., 2018; Yang et al., 2020).

En escalas de tiempo prolongadas, la intervención de actividades antrópicas desarrolladas en cauces naturales, como la presencia de embalses y las extracciones de áridos, tienen un impacto importante en el desarrollo gradual de la socavación. Los embalses retienen completamente el transporte de fondo y gran parte del transporte en suspensión, disminuyendo el caudal sólido aguas abajo. Para equilibrar la tasa de transporte de sedimentos por la disminución del caudal sólido, incrementa la pendiente de fondo induciendo gradualmente la socavación general aguas abajo (Kondolf, 1994; Kondolf, 1997). La extracción de áridos mediante fosas de excavación retiene gran parte del transporte en suspensión, disminuyendo el caudal sólido a aguas abajo, análogamente a la intervención de los embalses. Por otro lado, las fosas de excavación tienen un efecto difusivo en la pendiente de fondo, induciendo gradualmente la socavación general aguas arriba hasta por varios kilómetros (Kondolf, 1994; Kondolf, 1997). Adicionalmente, la intervención antrópica mediante obras de defensas fluviales puede presentar efectos contraproducentes relacionados al desarrollo de la socavación. Por un lado, las defensas longitudinales (o encauzamientos) emplazadas directamente aguas arriba de un puente, concentran y dirigen el caudal peak durante las crecidas. Por otro lado, las defensas transversales emplazadas directamente aguas arriba de un puente, puede reducir considerablemente el ancho de la sección transversal de escurrimiento, y eventualmente, ante el colapso durante una crecida, suponen un incremento del caudal peak. En ambos casos, para obras de defensas longitudinales y transversales, el incremento del caudal peak implica un mayor velocidad del flujo, y eventualmente, mayor socavación,

La Figura 2.7 presenta fotografías de puentes colapsados por socavación. Las fotografías fueron extraídas de WMC Action News 5 (1989), Wang y Wang (2012) y Deng et al. (2015).

Figura 2.7. Fotografías de puentes colapsados por socavación.



Fuente: WMC Action News 5 (1989), Wang y Wang (2012) y Deng et al. (2015).

De la Figura 2.7, el colapso de un puente por socavación está implícito. A diferencia del colapso por coronamiento, debido únicamente ante un caudal peak de crecida asociado a un período de retorno por sobre la condición de diseño, la socavación incluye el desarrollo progresivo durante la etapa en servicio, pudiendo derivar en el colapso de un puente simultáneamente ante un caudal peak de crecida asociado a un período de retorno inferior a la condición de diseño, o incluso, ante caudales ordinarios. El desarrollo progresivo de socavación está relacionado principalmente a la sucesión de crecidas menores, migración (en planta) del cauce, presencia de embalses aguas arriba, extracciones de áridos y efectos contraproducentes de obras de defensas fluviales, pudiendo contribuir gradualmente en la acumulación de socavación progresiva durante la etapa en servicio. En este caso, determinar la causa de colapso de un puente requiere análisis forense. En este caso, determinar la causa de colapso de un puente requiere análisis forense.

2.4 Casos de estudio

2.4.1 Descripción

Los casos de estudio de análisis forense de puentes se centran en Estados Unidos (Storey & Delatte, 2003; Lin et al., 2014), Nueva Zelanda (Melville & Coleman, 2000; Melville & Coleman, 2001) y Taiwán (Ko et al., 2014; Wang et al., 2014; Wu et al., 2014).

La Tabla 2.1 presenta la descripción general de los casos de estudio.

Tabla 2.1. Casos de estudio: Descripción general.

Nro.	Autores	Región	Puente	Lat.	Long.	Etapas en servicio	Edad (años)	Referencias
1	Melville y Coleman	NZ	Blackmount	45°36'S	167°42'E	N/A - 1980	N/A	Melville y
			Bulls	40°11'S	175°23'E	1949 - 1973	24	Coleman (2000),
			Mahitahi	43°38'S	169°35'E	1937 - 1955	18	Melville y Coleman (2001)
2	Wang et al.	TW	Shuang-Yuan	22°29'N	120°25'E	1974 - 2009	35	Wang y Wang (2012), Ko et al. (2014), Wang et al. (2014), Wu et al. (2014)
3	Lin et al.	US	Schoharie	42°55'N	74°16'W	1954 - 1987	33	Storey y Delatte (2003), Lin et al. (2014)

De Tabla 2.1, los puentes de los casos de estudio presentan una etapa en servicio relativamente corta y colapsaron dentro de su vida útil supuesta.

La Tabla 2.2 presenta la descripción del diseño estructural de los puentes de los casos de estudio.

Tabla 2.2. Casos de estudio: Descripción diseño estructural.

Nro.	Puente	Longitud total (m)	Cantidad de losas	Diseño superestructura	Diseño infraestructura	
					Cepas	Fundaciones
1	Blackmount	80	2	Vigas	Muro lleno	Profundas
	Bulls	495	16	Vigas	Muro lleno	Profundas
	Mahitahi	160	9	Vigas	Muro lleno	Profundas
2	Shuang-Yuan	2.080	66	Vigas	Columnas	Profundas
3	Schoharie	165	5	Vigas	Columnas	Directas

De la Tabla 2.2, los puentes de los casos de estudio comprenden diseño estructural de vigas constituidos por losas y cepas. Particularmente, presentan una variabilidad importante respecto de la longitud total.

2.4.2 Análisis forense

El análisis forense no se rige por normativas oficiales, sin embargo, en la práctica, se aplican procedimientos rigurosos identificados a partir de casos de estudio de literatura de ingeniería forense. Los autores de los casos de estudio conducen el análisis forense de puentes en función de los acontecimientos presentados para cada caso particular, con diferentes factores relacionados a la socavación destacados en una breve descripción del área de estudio.

La Tabla 2.3 presenta la descripción de las áreas de estudio respecto del sitio de emplazamiento de los puentes de los casos de estudio.

Tabla 2.3. Casos de estudio: Descripción áreas de estudio.

Nro.	Puente	Río	$Q_m(\text{anual})$ (m^3/s)	Cauce (en planta)	División hidrográfica	Intervención actividades antrópicas
1	Blackmount	Mararoa	440	Meandriforme	Llanura aluvial	N/A
	Bulls	Rangitikei	730	Trenzado	Llanura aluvial	Ext. áridos, encauzamientos.

Tabla 2.3 Casos de estudio: Descripción áreas de estudio (cont.).

Nro.	Puente	Río	$Q_m(\text{anual})$ (m^3/s)	Cauce (en planta)	División hidrográfica	Intervención actividades antrópicas
	Mahitahi	Mahitahi	950	Trenzado	Llanura aluvial	N/A
2	Shuang-Yuan	Kaoping	N/A	Meandriforme	Desembocadura	Ext. áridos, embalses aguas arriba
3	Schoharie	Schoharie	570	Meandriforme	Llanura aluvial	Embalses aguas arriba

Q_m : Caudal medio anual (m^3/s), a partir de una serie de caudales medios diarios anuales.

De la Tabla 2.3, la geomorfología (en planta) comprende cauces meandriformes y trezados; los cauces meandriformes están compuestos por un solo cauce principal sinuoso con secciones transversales asimétricas y se caracterizan por la migración del cauce, presentando un desplazamiento gradual de los meandros hacia aguas abajo; los cauces trezados están compuestos por múltiples cauces menores entrelazados y se caracterizan por su inestabilidad, presentando una variabilidad espacial importante en sección transversal y pendiente de fondo con el transcurso de una crecida. La división hidrográfica de la cuenca comprende la cabecera de los ríos, llanuras aluviales (o valles) y la desembocadura; la cabecera de los ríos presenta una topografía pronunciada, lecho compuesto por áridos gruesos y se caracteriza por la alta velocidad del flujo; las llanuras aluviales presentan una topografía menos pronunciada, lecho compuesto por áridos menos gruesos y se caracteriza por el continuo desarrollo de la migración del cauce; la desembocadura presenta una topografía plana, lecho compuesto por áridos más finos y se caracteriza por la agradación del lecho y la formación de los deltas de sedimentos. La intervención de actividades antrópicas desarrolladas en el cauce fue presentada en el punto 2.3.3. En resumen, los diferentes factores relacionados a la socavación, destacados con la descripción de las áreas de estudio, condicionan indirectamente diferentes análisis forense para cada caso particular.

2.5 Conclusiones

La revisión del estado del arte presenta la importancia del análisis forense de puentes debido a la complejidad de la socavación como causa de colapso, implicando múltiples factores que contribuyen al desarrollo progresivo. Relacionar las intervenciones antrópicas al desarrollo progresivo de la socavación sirve con el propósito de atribuir, eventualmente, la responsabilidad a las partes involucradas. Cabe señalar, es importante tener en cuenta la dificultad de cuantificar el impacto de las intervenciones antrópicas durante un análisis forense. Sin embargo, abordar el impacto de la actividad de intervenciones antrópicas mediante una evaluación cualitativa, complementando la teoría con la información proporcionada por la entidad a cargo de la concesión de los puentes (e.g. batimetrías históricas, reportes de inspección y mantenimiento), y con la información proporcionada por la entidad a cargo de las evaluaciones de impacto ambiental (e.g. documentación de las políticas de operación y regulación de embalses y extracción de áridos), suelen revelar información útil para guiar el análisis forense.

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Introducción

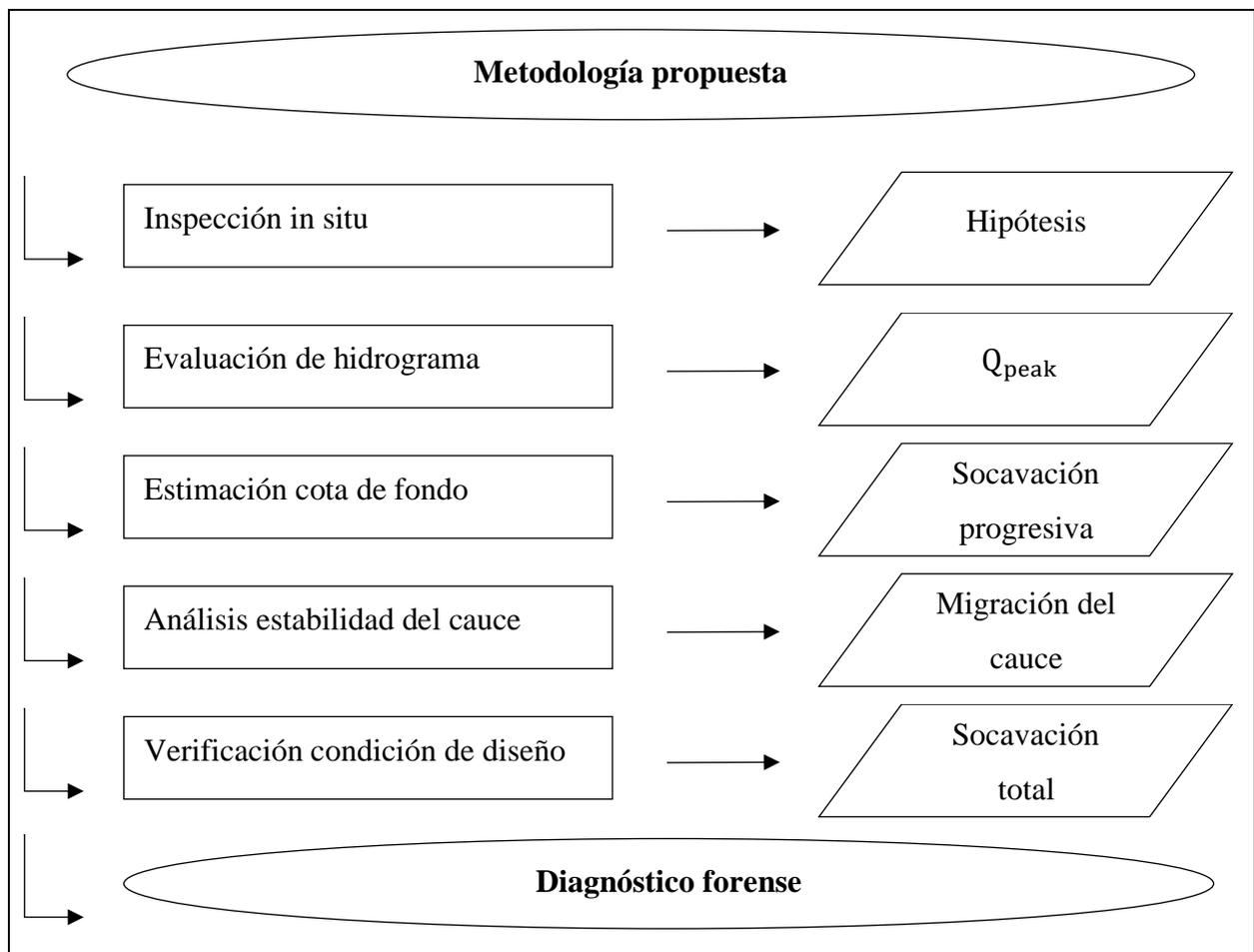
Este capítulo presenta la metodología propuesta para la análisis forense de puentes colapsados por causas hidráulicas.

3.2 Metodología propuesta

3.2.1 Esquema

La Figura 3.1 presenta el esquema inicial de la metodología propuesta.

Figura 3.1. Metodología propuesta.

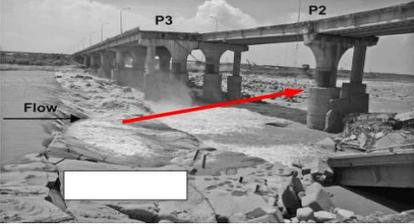


3.2.2 Inspección in situ

La metodología propuesta sugiere preliminarmente la inspección *in situ* para reconocer evidencia de socavación ante el colapso del puente y plantear la hipótesis para conducir el análisis forense. La evidencia de socavación para plantear la hipótesis como causa de colapso se fundamenta con la cota de fondo observada (o medida) a partir de las cepas aledañas a las cepas colapsadas. La cota de fondo por debajo del sello de excavación de las fundaciones, i.e. con pilotes expuestos, no corresponde a la cota de fondo de proyecto y supone el colapso debido a socavación.

La Figura 3.2 presenta evidencia *in situ* de la cota de fondo por debajo del sello de excavación de las fundaciones mediante una fotografía representativa extraída de Hong et al. (2012).

Figura 3.2. Inspección in situ.

Evidencia in situ	Fotografías (representativa) in situ	Hipótesis de colapso	
Inspección in situ	Cota de fondo por debajo del sello de excavación de las fundaciones (no está necesariamente en la condición de diseño, pero sugiere la socavación como la causa de colapso).		Socavación.

Fuente: Hong et al. (2012).

De la Figura 3.2, la cota de fondo por debajo del sello excavación de las fundaciones es perceptible mediante reconocimiento visual. Sin embargo, dependiendo del nivel de la cota de aguas, la cota de fondo puede no ser perceptible mediante reconocimiento visual. En este caso, la metodología propuesta sugiere suponer la evidencia de socavación. Eventualmente, si se dispone de equipamiento para realizar una breve inspección submarina es válido.

Confirmada la evidencia de socavación, es necesaria la obtención de parámetros hidráulicos y geotécnicos precisados en las fórmulas de socavación establecidas por los códigos de diseño para verificar la condición de diseño hidráulica para la profundidad de socavación total. Si no se dispone de la documentación de proyecto, o bien, de la documentación de inspecciones *in situ* recientes, la

metodología propuesta sugiere emplear batimetría en la sección transversal de escurrimiento, aguas arriba y aguas abajo, y muestreo de suelo en las planicies de inundación aledañas al sitio de emplazamiento del puente. La Figura 3.3 y Figura 3.4 presentan esquemas tipo de batimetría y muestreo de suelo, respectivamente.

Figura 3.3. Esquema: Batimetría.

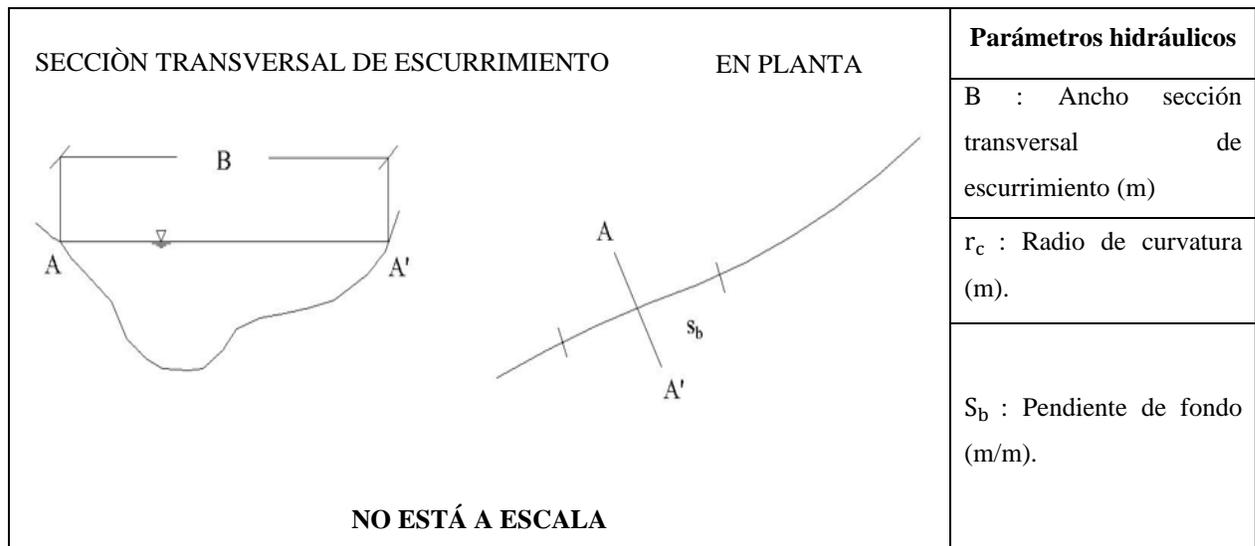
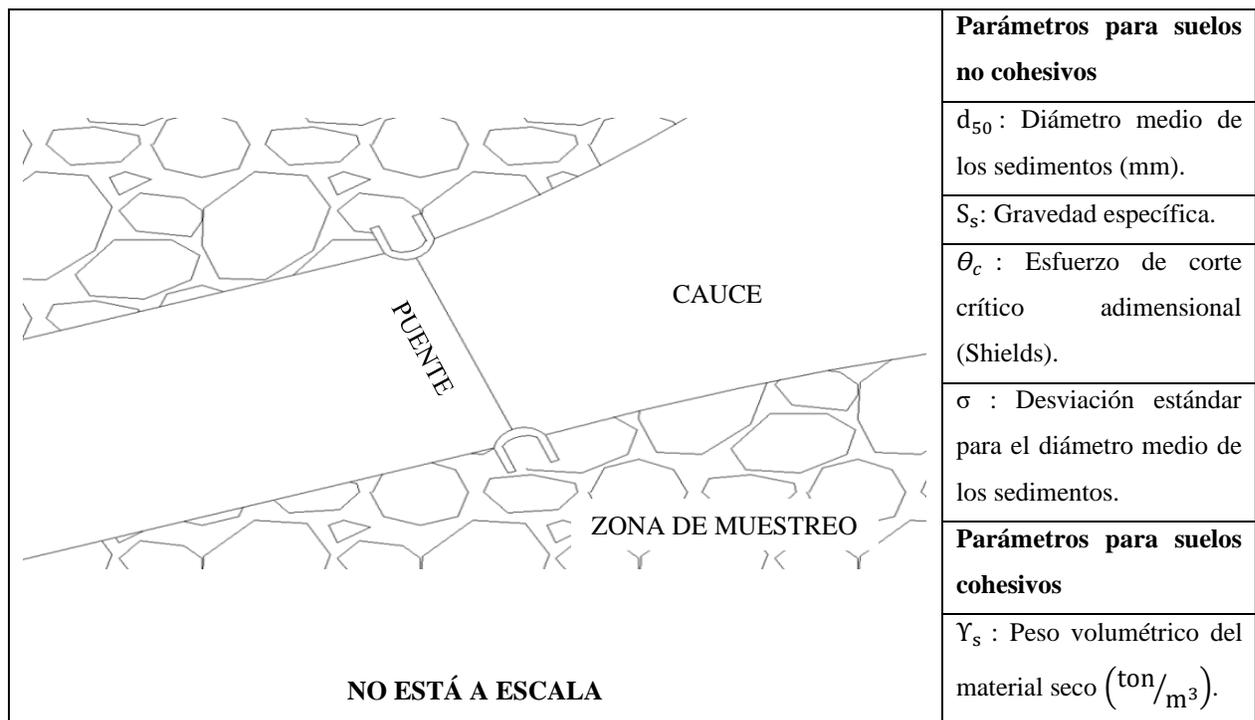
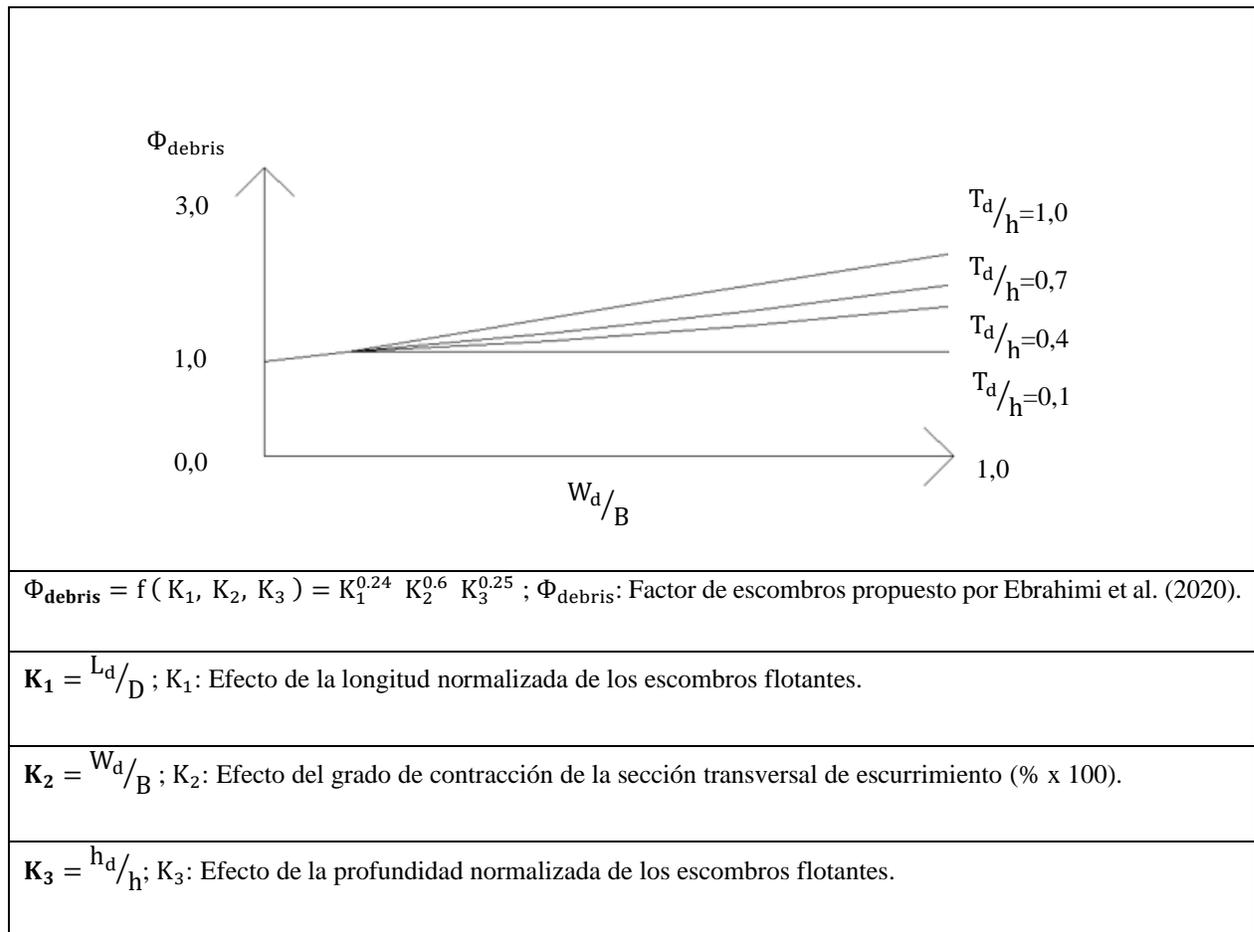


Figura 3.4. Esquema: Muestreo de suelo.



Adicionalmente, ante evidencia de escombros flotantes acumulados en las cepas, la metodología propuesta sugiere la obtención del factor de escombros mediante el método propuesto por Ebrahimi et al. (2020). El método propuesto por Ebrahimi et al. (2020) para cuantificar la socavación local en función de los escombros flotantes acumulados en las cepas, a diferencia de los métodos propuestos por Laursen y Toch (1956), Melville y Dongol (1992) y Lagasse et al. (2010), está validado para las 3 muestras de datos experimentales disponibles de literatura, es empleable prácticamente a todas las ecuaciones de socavación local sugeridas por los códigos de diseño, dispone de la aplicación a un caso de estudio particular y facilita los gráficos para la obtención del factor de escombros mediante las mediciones obtenidas *in situ* (o con fotografías). La Figura 3.5 presenta un esquema tipo de los gráficos propuestos por Ebrahimi et al. (2020).

Figura 3.5. Esquema: Gráfico para la obtención del factor de escombros propuesto por Ebrahimi et al. (2020).

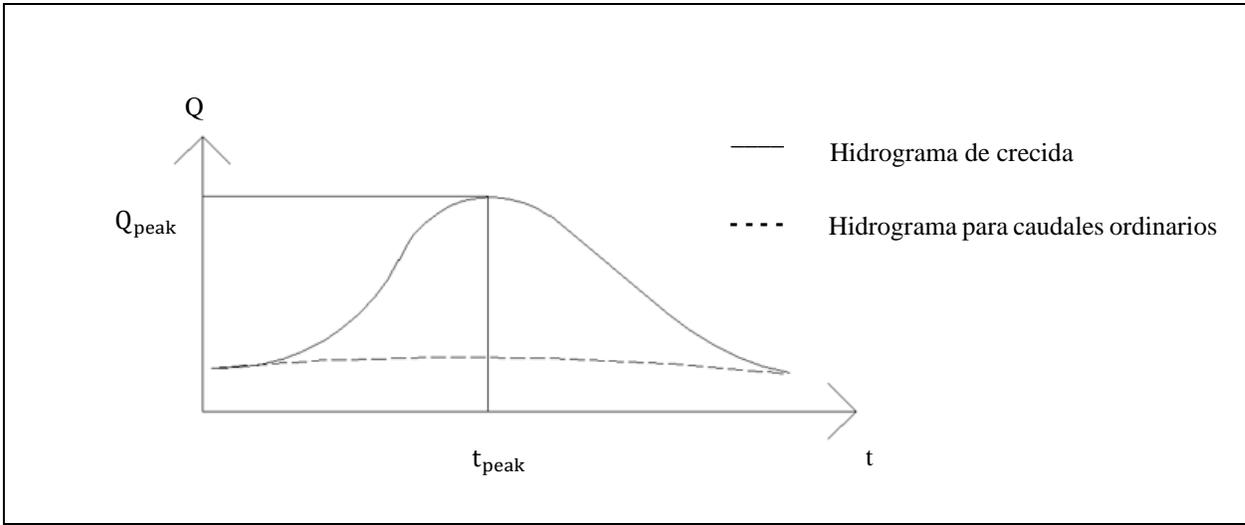


Finalizada la inspección *in situ*, la metodología propuesta sugiere la obtención del hidrograma transcurrido durante el colapso.

3.2.3 Hidrograma

La metodología propuesta sugiere la obtención del hidrograma transcurrido durante el colapso, para determinar si aconteció un caudal peak de crecida inferior o por sobre la condición de diseño. La Figura 3.6 presenta un esquema tipo de hidrograma.

Figura 3.6. Esquema: Hidrograma.



La obtención del hidrograma depende de la disponibilidad de las estaciones fluviométricas. Para una estación fluviométrica ubicada en el sitio de emplazamiento del puente, la obtención del hidrograma es inmediata. Para estaciones fluviométricas ubicadas aguas arriba o aguas abajo del sitio de emplazamiento del puente, la obtención del hidrograma requiere de la trasposición de caudales desde la estación seleccionada. Sin embargo, en ausencia de estaciones fluviométricas, la obtención del hidrograma requiere de modelos de precipitación-escorrentía mediante hietograma, método del hidrograma unitario y delimitación del área de drenaje.

Entonces, el caudal peak asociado al hidrograma transcurrido durante el colapso se compara con el caudal peak en condición de diseño, i.e. caudal peak de proyecto. Si no se dispone de la documentación de proyecto, la metodología propuesta sugiere estimar el caudal peak de proyecto mediante un estudio hidrológico, en función de un período de retorno correspondiente a la especificaciones técnicas del puente en particular.

La Tabla 3.1 presenta la decisión de la metodología propuesta con respecto al caudal peak asociado al hidrograma transcurrido durante el colapso.

Tabla 3.1. Metodología propuesta: Hidrograma.

Hidrograma	Metodología propuesta
Si $Q_{\text{peak}} < Q_{\text{proyecto}}$	Continúa el análisis forense
Si $Q_{\text{peak}} > Q_{\text{proyecto}}$	Concluye el análisis forense

Q_{peak} : Caudal peak asociado al hidrograma transcurrido durante el colapso

Q_{proyecto} : Caudal peak de proyecto

De la Tabla 3.1, el colapso de un puente ante un caudal peak de crecida por sobre el caudal peak de proyecto es trivial, y en este caso, la metodología propuesta concluye el análisis forense. Sin embargo, el colapso de un puente ante un caudal ordinario, o bien, ante un caudal peak de crecida inferior al caudal peak de proyecto no lo es, en efecto, la estructura debiera permanecer en servicio. Bajo esta condición, es de suponer que el sitio de emplazamiento del puente presentase la acumulación progresiva de socavación durante la etapa en servicio.

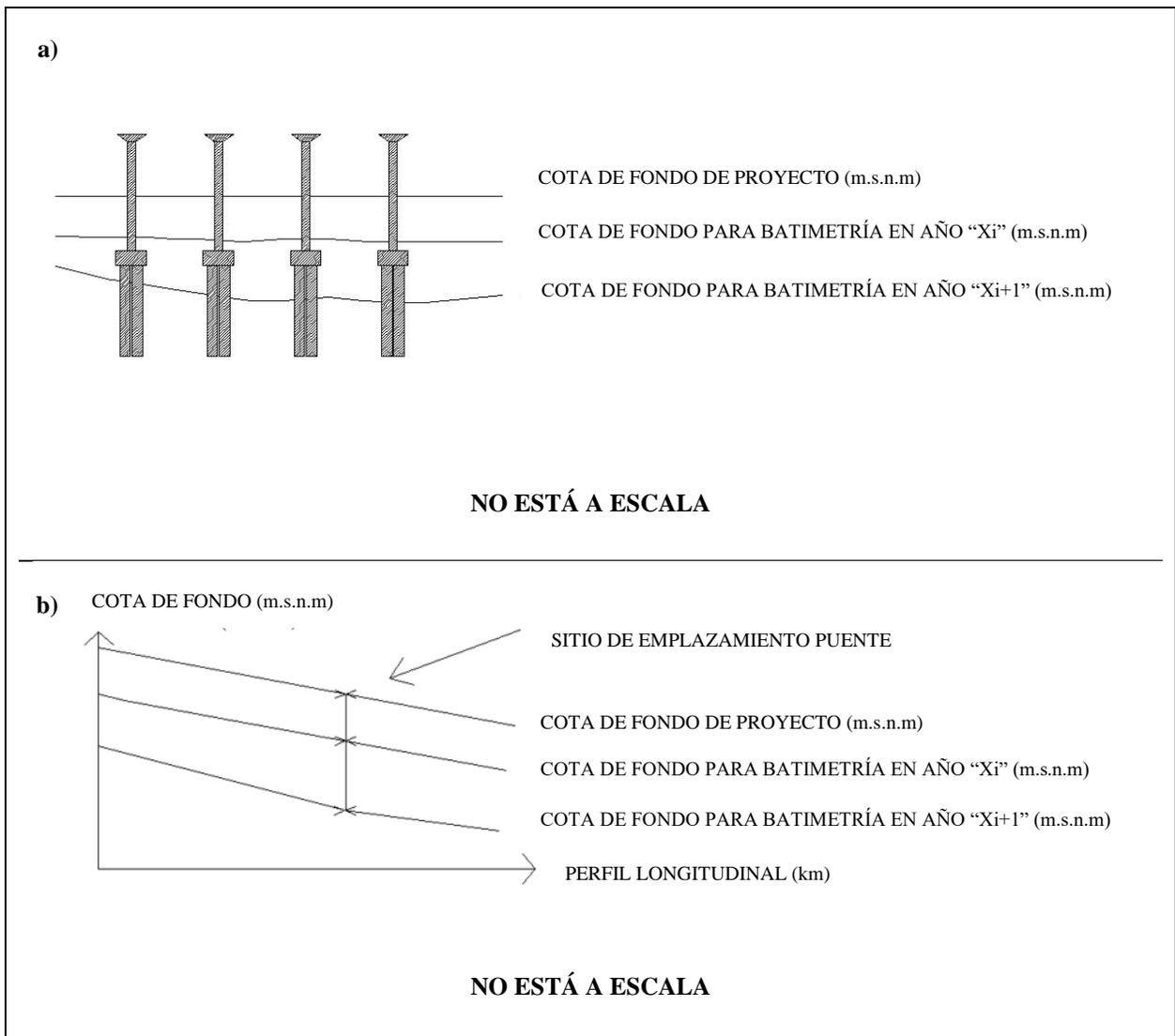
Finalizada la obtención del hidrograma transcurrido durante el colapso, la metodología propuesta sugiere la estimación de la cota de fondo en el sitio de emplazamiento del puente relacionada a la acumulación progresiva de socavación durante la etapa en servicio.

3.2.4 Cota de fondo

La metodología propuesta sugiere la estimación de la cota de fondo en el sitio de emplazamiento del puente, para determinar si el puente presentaba la acumulación progresiva de socavación durante la etapa en servicio, i.e. previamente al hidrograma transcurrido durante el colapso.

En primer lugar, la metodología propuesta sugiere la solicitud de batimetrías históricas a la entidad concesionaria del puente. La Figura 3.7 presenta un esquema tipo de batimetrías históricas.

Figura 3.7. Esquema: a) Batimetrías históricas en la sección transversal de escurrimiento; b) Batimetrías históricas en planta.



De la Figura 3.7, el sitio de emplazamiento de un puente debiera disponer de batimetrías históricas actualizadas, puesto que el programa de mantenimiento establecido por los códigos de diseño de puentes incluye inspecciones periódicas para intervalos de no más de 5 años e inspecciones eventuales ante caudales peak de crecida con períodos de retorno superiores a 5 años. En este caso, las batimetrías históricas permiten relacionar, eventualmente, la acumulación socavación progresiva a los eventos ocurridos durante la etapa en servicio, destacando la sucesión de crecidas menores y las actividades antrópicas desarrolladas en el cauce.

Sin embargo, en ausencia de batimetrías históricas, y debido a la dificultad de cuantificar la acumulación progresiva de socavación durante la etapa en servicio, la metodología propuesta sugiere la simulación de caudales mediante la serie de máximos (instantáneos) diarios desde la fecha correspondiente al escenario de proyecto.

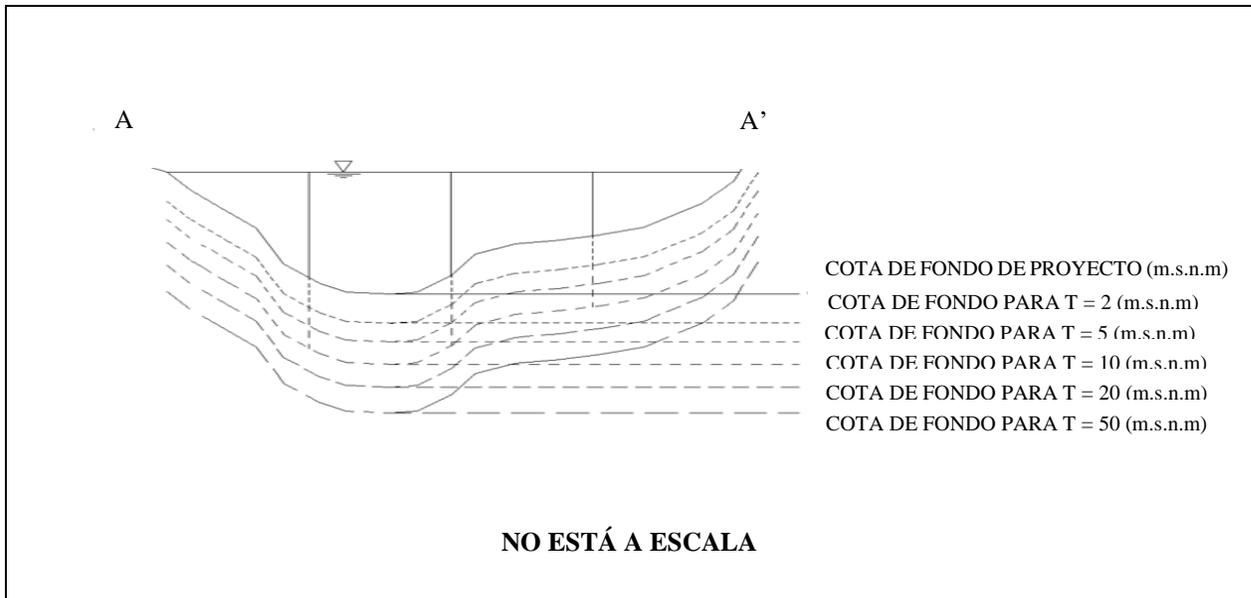
La Tabla 3.2 presenta una tabla tipo de resultados obtenidos mediante una simulación de caudales para los caudales asociados a los períodos de retorno típicos de crecidas menores, conocidas la cota de fondo de proyecto, coeficiente de rugosidad de Manning, pendiente de fondo y sección transversal de escurrimiento.

Tabla 3.2. Metodología propuesta: Simulación de caudales.

Simulación de caudales								
Sección	T	Q (m ³ /s)	Velocidad del flujo (m/s)	Área mojada (m ²)	Ancho espejo de agua (m)	Cota de agua (m.s.n.m)	Profundidad del flujo (m)	Perímetro mojado (m)
A-A' (Figura 3.8)	2	Q_(T=2)	V_(T=2)	A_(T=2)	B_(T=2)	C_(T=2)	y_(T=2)	P_(T=2)
	5	Q_(T=5)	V_(T=5)	A_(T=5)	B_(T=5)	C_(T=5)	y_(T=5)	P_(T=5)
	10	Q_(T=10)	V_(T=10)	A_(T=10)	B_(T=10)	C_(T=10)	y_(T=10)	P_(T=10)
	20	Q_(T=20)	V_(T=20)	A_(T=20)	B_(T=20)	C_(T=20)	y_(T=20)	P_(T=20)
	50	Q_(T=50)	V_(T=50)	A_(T=50)	B_(T=50)	C_(T=50)	y_(T=50)	P_(T=50)

De la Tabla 3.2, la metodología propuesta sugiere calcular la acumulación de la socavación progresiva en la sección transversal de escurrimiento mediante las fórmulas establecidas por los códigos de diseño y estimar la cota de fondo previamente al hidrograma transcurrido durante el colapso. La Figura 3.8 presenta un esquema tipo para las cotas de fondo estimadas en función de los caudales peak para los períodos de retorno típicos de crecidas menores.

Figura 3.8. Esquema: Cota de fondo para períodos de retorno típicos.

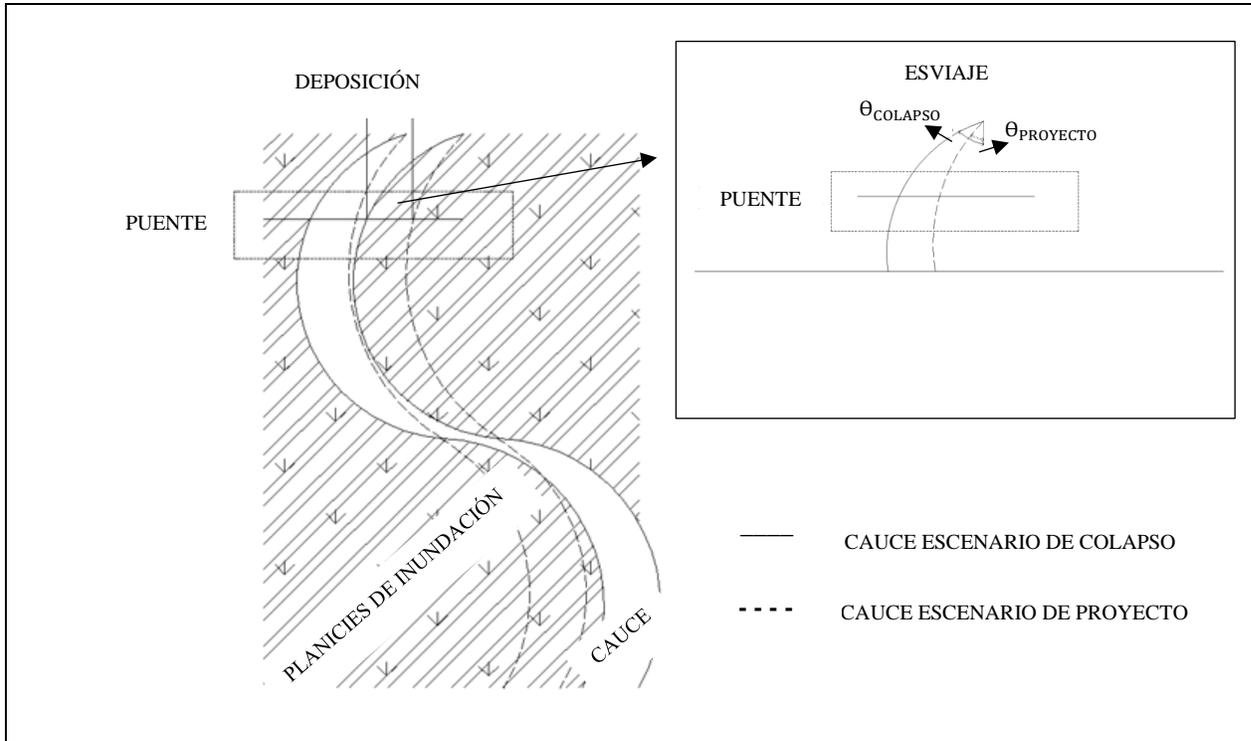


De la Figura 3.8, la cota de fondo para los períodos de retorno típicos de crecidas menores está estimada únicamente en función de los caudales. Sin embargo, la intervención de actividades antrópicas como las extracciones de áridos y la presencia de embalses aguas arriba del sitio de emplazamiento del puente, pueden también haber inducido progresivamente la socavación general durante la etapa en servicio y no están consideradas dentro de la simulación de caudales. Particularmente, para las extracciones de áridos, Álvarez (2019) determinó una correlación significativa entre la socavación de puentes y los grandes volúmenes de extracción, sobre todo, para pequeñas distancias entre el sitio de emplazamiento de los puentes y las fosas de excavación. Entonces, la metodología propuesta sugiere estudiar la presencia de eventuales faenas de extracción aguas arriba y aguas abajo, destacando la escala de tiempo de operación (mayor escala de tiempo, mayor volumen extraído) y la distancia entre las faenas de extracción de áridos y el sitio de emplazamiento del puente. Análogamente, para la presencia de embalses y obras de defensas fluviales aguas arriba, se supone el mismo el criterio de evaluación.

3.2.5 Estabilidad del cauce

La metodología propuesta sugiere el análisis de la estabilidad del cauce para identificar, eventualmente, la interceptación de la migración (en planta) del cauce en el sitio de emplazamiento del puente. La Figura 3.9 presenta un esquema tipo de migración (en planta) del cauce.

Figura 3.9. Esquema: Migración (en planta) del cauce.



De la Figura 3.9, la metodología propuesta sugiere la examinación de imágenes aéreas para las fechas correspondientes al escenario de colapso y al escenario de proyecto. Las imágenes aéreas pueden descargarse directamente desde el software Google Earth, o bien, desde el sitio web de la USGS (United States Geological Survey). Cabe señalar, las imágenes aéreas más remotas presentan bajas resoluciones espaciales, sin embargo, puede complementarse con softwares GIS (Geographic Information System) mediante combinaciones de banda para resaltar la visualización en el sitio de emplazamiento del puente. Adicionalmente, para vincular la migración del cauce a un desarrollo progresivo de manera natural, o bien, por la intervención de actividades antrópicas, la metodología propuesta sugiere la descarga de imágenes aéreas históricas durante la etapa en servicio, recopilando imágenes con intervalos de tiempo relativamente espaciados.

3.2.6 Condición de diseño hidráulica

Finalmente, la metodología propuesta sugiere la verificación de la condición de diseño de socavación. La Tabla 3.3 presenta los parámetros de entrada precisados según las fórmulas de socavación establecidas en los códigos de diseño.

Tabla 3.3. Metodología propuesta: Parámetros de entrada

Inputs	
Hidráulicos	Ancho sección transversal de escurrimiento (m).
	Profundidad del flujo (m).
	Pendiente de fondo (m/m).
	Radio de curvatura.
Hidrograma	Caudal (m^3/s).
	t (s).
Geotecnia	d_{50} : Diámetro medio de los sedimentos (mm).
	S_s : Gravedad específica.
	θ_c : Esfuerzo de corte crítico adimensional (Shields).
	σ : Desviación estándar para el diámetro medio de los sedimentos.
	γ_s : Peso volumétrico del material seco (ton/m^3).
Estructura	Θ : Ángulo de ataque ($^\circ$) (imágenes aéreas)
	D_e : Diámetro equivalente (m) (Considerando factores de geometría de la estructura, incluyendo factor de escombros flotantes).

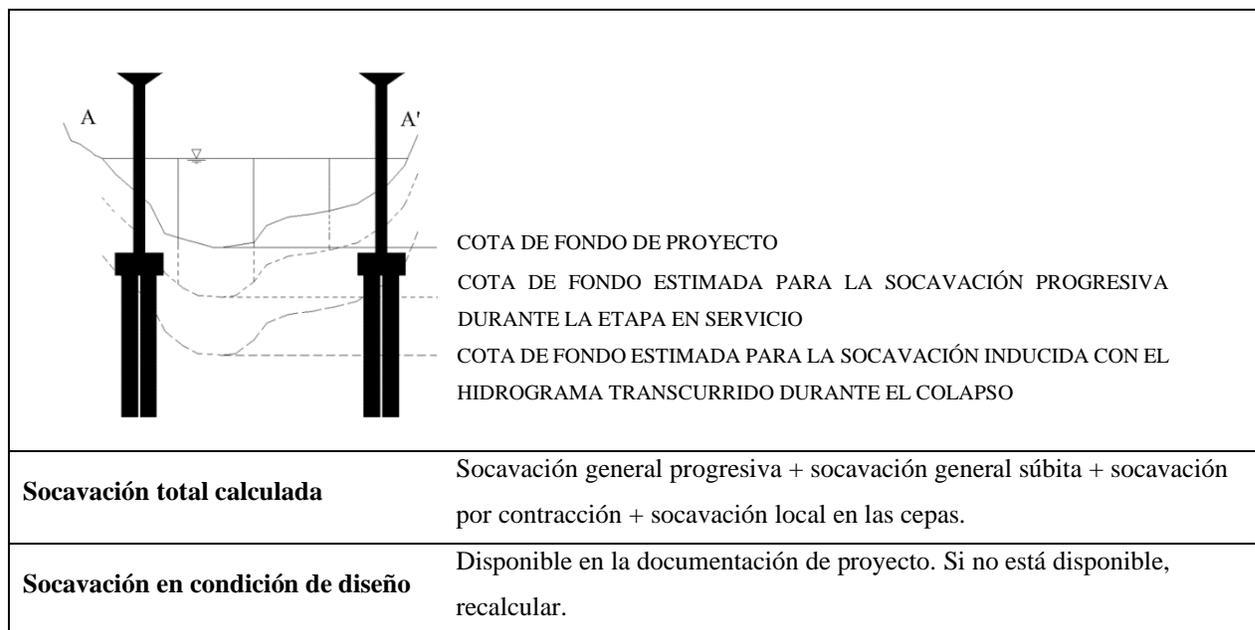
Las fórmulas de socavación precisadas por los códigos de diseño establecen el cálculo de la profundidad de socavación total mediante la superposición de los términos independientes correspondientes a la socavación general, socavación por contracción y socavación local. La Tabla 3.4 presenta los distintos tipos de socavación y los factores relacionados determinados mediante el análisis forense.

Tabla 3.4. Metodología propuesta: Socavación y factores relacionados.

Causas hidráulicas	Factores
Socavación general progresiva (etapa en servicio)	Hidrograma de crecidas menores sucesivas
	Intervención de actividades antrópicas
Socavación general súbita	Hidrograma de crecida transcurrido durante el colapso
Socavación por contracción	Angostamiento del cauce desde aguas arriba (de manera natural o por intervenciones antrópicas)
Socavación local en las cepas	Esviaje del puente
	Escombros flotantes acumulados

La Figura 3.10 presenta un esquema para la profundidad de socavación total considerando el descenso de la acumulación de socavación progresiva durante la etapa en servicio y de la socavación para el hidrograma transcurrido durante el colapso.

Figura 3.10. Esquema: Socavación total.



3.2.7 Diagnóstico forense

La Tabla 3.5 presenta el planteamiento del diagnóstico forense según la metodología propuesta.

Tabla 3.5. Metodología propuesta: Diagnóstico forense.

Diagnóstico forense		
Verificación condición de diseño	Socavación	Factores relacionados
Socavación total calculada > socavación en condición de diseño	Colapso debido a socavación.	Señalar los factores relacionados que contribuyeron en la socavación por sobre la condición de diseño, e.g., crecidas menores sucesivas, escombros flotantes acumulados, migración del cauce, intervenciones antrópicas.
Socavación total calculada < socavación en condición de diseño	Colapso debido no solo a socavación.	Señalar los factores relacionados que contribuyeron en la socavación. Adicionalmente, impulsar análisis forense no por causas hidráulicas, sino con ensayos de laboratorio mediante muestras de hormigón, estudios de registros de actividad sísmica, etc.

De la Tabla 3.5, si la socavación total calculada excede la socavación en condición de diseño, entonces se valida la hipótesis de socavación como causa de colapso y se señalan los factores relacionados determinados con la análisis forense. Caso contrario, si la socavación total no excede la socavación en condición de diseño, entonces la socavación no corresponde a la única causa de colapso y es necesario analizar posibles deficiencias estructurales por fatiga y corrosión mediante ensayos de laboratorio, registros de actividad sísmica durante la etapa en servicio, o bien, algún otro acontecimiento en particular.

3.3 Conclusiones

La metodología propuesta sirve para validar (o descartar) la hipótesis de socavación como causa de colapso, señalar los factores relacionados que contribuyeron a una condición por sobre la de diseño y establecer el diagnóstico forense. Particularmente, la metodología propuesta fundamenta la hipótesis del colapso debido a socavación mediante la inspección *in situ*, sin embargo, también es posible efectuar la metodología bajo la misma hipótesis sin la inspección *in situ* de manera preliminar.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1 Introducción

Este capítulo presenta los resultados obtenidos mediante el análisis comparativo de los casos de estudio presentados en la revisión del estado del arte, en función de la metodología propuesta.

4.2 Metodología propuesta

4.2.1 Inspección in situ

La metodología propuesta sugiere preliminarmente la inspección *in situ* para reconocer evidencia de socavación ante el colapso del puente y establecer la hipótesis para conducir el análisis forense. Las metodologías de análisis forense aplicadas en los casos de estudio reconocen evidencia de socavación ante el colapso de los puentes.

La Tabla 4.1 presenta la descripción de la evidencia *in situ*, fotografías de los puentes colapsados y la hipótesis para los casos de estudio. Las fotografías fueron extraídas de Schenectady Gazette (1987), Melville y Coleman (2001) y Cheng Lin (2009).

Tabla 4.1. Casos de estudio: Inspección in situ.

Metodología	Puente	Evidencia in situ	Fotografía in situ	Hipótesis
Melville y Coleman	Blackmount	Cota de fondo bajo sello excavación de las fundaciones.		Socavación

Fuente: Melville y Coleman (2001)

Tabla 4.1. Casos de estudio: Inspección in situ (cont.).

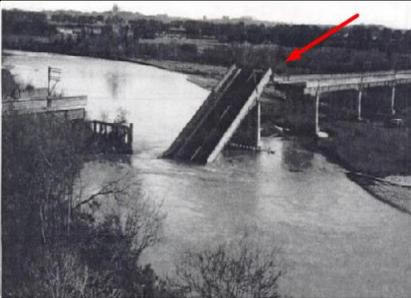
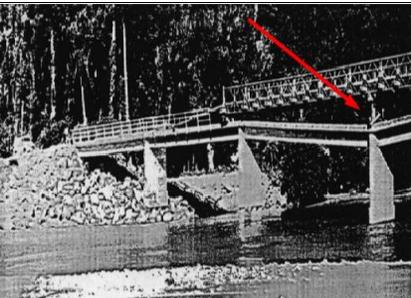
Metodología	Puente	Evidencia in situ	Fotografía in situ	Hipótesis
Melville y Coleman	Bulls	Cota de fondo bajo sello excavación de las fundaciones.	 <p data-bbox="824 751 1203 779"><i>Fuente: Melville y Coleman (2001)</i></p>	Socavación
	Mahitahi	Cota de fondo bajo sello excavación de las fundaciones.	 <p data-bbox="824 1192 1203 1220"><i>Fuente: Melville y Coleman (2001)</i></p>	Socavación
Wang et al.	Shuang-Yuan	Cota de fondo bajo sello excavación de las fundaciones.	 <p data-bbox="873 1640 1154 1667"><i>Fuente: Cheng Lin (2009)</i></p>	Socavación

Tabla 4.1. Casos de estudio: Inspección *in situ* (cont.).

Puente	Evidencia in situ	Fotografía in situ	Hipótesis
Lin et al.	Schoharie		Socavación

The Daily Gazette (1987).

De la Tabla 4.1, 5/5 casos de estudio presentaron evidencia de socavación *in situ* mediante reconocimiento visual y batimetría.

La metodología aplicada por Melville y Coleman, no especifica métodos para evidenciar socavación *in situ*, sin embargo, indican la profundidad de socavación medida, aparentemente mediante inspecciones submarinas o batimetría. Disponen de la prospección de suelo de proyecto. Adicionalmente, para el caso de estudio del puente Bulls, indican la presencia de escombros flotantes acumulados en las cepas.

La metodología aplicada por Wang et al., especifican batimetría con métodos por sondas y método geofísico ERT (Electrical Resistivity Tomography), evidenciando restos estructurales de hormigón soterrados a una profundidad entre 15 y 20 m, suponiendo esta como la profundidad máxima de socavación. Disponen de la prospección de suelo de proyecto. Adicionalmente, indican la presencia de escombros flotantes acumulados en las cepas.

La metodología aplicada por Lin et al., especifican batimetría con métodos directos para evidenciar socavación *in situ*, destacando la dificultad del procedimiento por la necesidad de remover los restos estructurales. Disponen de la prospección de suelo de proyecto.

4.2.2 Hidrograma

La metodología propuesta sugiere la obtención del hidrograma transcurrido durante el colapso para determinar si aconteció un caudal peak de crecida con período de retorno inferior o por sobre la condición de diseño. Las metodologías aplicadas en los casos de estudio obtuvieron los hidrogramas transcurridos durante el colapso de los puentes.

La Tabla 4.2 presenta los caudales peak de crecida obtenidos a partir de los hidrogramas transcurridos durante el colapso de los puentes.

Tabla 4.2. Casos de estudio: Caudales peak de crecida.

Metodología	Puente	Q_{peak} (m^3/s)	T_{crecida} (años)	$T_{\text{diseño}}$ (años)
Melville y Coleman	Blackmount	980	50	100
	Bulls	670	1	N/A
	Mahitahi	1.200	15	100
Wang et al.	Shuang-Yuan	35.000	> 200	100
Lin et al.	Schoharie	1.800	50	100

T : Período de retorno.

Las metodologías aplicadas por Melville y Coleman, y Lin et al., especifican la obtención del hidrograma transcurrido durante el colapso a partir de estaciones fluviométricas cercanas. De la Tabla 4.2, los casos de estudio colapsaron ante caudales peak de crecida con períodos de retorno inferiores a la condición de diseño, continuando el análisis forense, puesto que los puentes debieron haber permanecido en servicio.

La metodología aplicada por Wang et al., especifica la obtención del hidrograma transcurrido durante el colapso a partir de un modelo de precipitación-escorrentía. De la Tabla 4.2, el caso de estudio colapsó ante un caudal peak de crecida con período de retorno por sobre la condición de diseño. En este caso, la metodología propuesta sugiere concluir el análisis forense. Sin embargo, la metodología aplicada por Wang et al. continúa el análisis forense, aparentemente por la incertidumbre en la obtención del caudal peak mediante el modelo de precipitación-escorrentía, justificando que las estaciones pluviométricas seleccionadas pudieron entregar una tasa de precipitación excesivamente alta, por la ubicación desfavorable de las estaciones.

4.2.3 Cota de fondo

La metodología propuesta sugiere la estimación de la cota de fondo previamente al hidrograma transcurrido durante el colapso, bajo el supuesto de que los puentes presentaban la acumulación de socavación progresiva, en orden de explicar el colapso ante un caudal peak de crecida con período de retorno inferior a la condición de diseño. Las metodologías aplicadas en los casos de estudio presentan las cotas de fondo estimadas previamente al hidrograma transcurrido durante el colapso.

La Tabla 4.3 presenta la estimación de la cota de fondo para los casos de estudio.

Tabla 4.3. Casos de estudio: Cota de fondo.

Metodología	Puente	Métodos	Cota de fondo	Factores relacionados
	Blackmount	N/A	N/A	N/A
Melville y Coleman	Bulls	N/A	Presentaba una socavación de 6,0 m .	Extracciones de áridos durante la etapa en servicio.
	Mahitahi	N/A	Presentaba una socavación de 3,5 m.	N/A
Wang et al.	Shuang-Yuan	Batimetrías históricas actualizadas.	No presentaba socavación.	N/A
Lin et al.	Schoharie	Registro de caudales y análisis de frecuencia.	Presentaba socavación (supuesto).	Sucesión de crecidas menores durante la etapa en servicio.

La metodología aplicada por Melville y Coleman, no especifica los métodos para estimar (o determinar) con exactitud la cota de fondo. Aparentemente, fue determinada mediante batimetrías históricas, o bien, por reportes de inspección que indicaban una condición crítica de los puentes. Particularmente, para el caso de estudio del puente Bulls, se identificaron seis faenas de extracción ubicadas en un rango de 2,2 km aguas abajo y 2,7 km aguas arriba, con una escala de operación de más de 30 años, contribuyendo a los 6,0 m de socavación progresiva durante la etapa en servicio.

La metodología aplicada por Wang et al., especifica la disponibilidad de batimetrías históricas en el sitio de emplazamiento del puente, evidenciando que el puente no presentaba la acumulación de socavación progresiva durante la etapa en servicio.

La metodología aplicada por Lin et al., identifica la sucesión de crecidas menores durante la etapa en servicio a partir del registro de caudales y análisis de frecuencia, incluso, destacando un caudal peak de crecida con período de retorno cercano a los 100 años, poco después de haber iniciado la etapa en servicio del puente. De este modo, suponen la acumulación de socavación progresiva durante la etapa en servicio, sin embargo, no especifican la estimación de la cota de fondo.

4.2.4 Estabilidad del cauce

La metodología propuesta sugiere el análisis de la estabilidad del cauce para identificar, eventualmente, la interceptación de la migración (en planta) del cauce en el sitio de emplazamiento del puente, comparando los cauces de proyecto y de colapso. Las metodologías aplicadas en los casos de estudio identifican la migración (en planta) del cauce.

La Tabla 4.4 presenta la descripción de los parámetros obtenidos mediante el análisis de la estabilidad del cauce.

Tabla 4.4. Casos de estudio: Estabilidad del cauce.

Nro.	Puente	Ancho sección transversal de escurrimiento (m)		Esviaje del puente (°)	
		Proyecto	Colapso	Proyecto	Colapso
Melville y Coleman	Blackmount	N/A	N/A	N/A	15°
	Bulls	120 m	90 m	N/A	10°
	Mahitahi	180 m	100 m	N/A	15°
Wang et al.	Shuang-Yuan	900 m	1.200 m	10°	30°
Lin et al.	Schoharie	N/A	N/A	N/A	N/A

La metodología aplicada por Melville y Coleman, especifica la recopilación de imágenes aéreas históricas, destacando el esviaje del puente como un factor determinante, debido a que los 3 casos de estudio corresponden a puentes constituidos por cepas de muro lleno.

La metodología aplicada por Wang et al. especifica la recopilación de imágenes aéreas históricas, destacando el esviaje del puente como un factor determinante, debido a que las cepas estaban cimentadas sobre vigas de fundación con dimensiones considerablemente mayores respecto de las cepas aledañas que no colapsaron.

La metodología aplicada por Lin et al., no especifica la recopilación de imágenes aéreas, sin embargo, mediante la recopilación de un mapa topográfico, destacan el esviaje del puente como un factor importante.

4.2.5 Condición de diseño hidráulica

La metodología propuesta sugiere la verificación de la condición de diseño de socavación mediante el cálculo de la socavación a partir de las fórmulas establecidas por los códigos de diseño con la superposición los términos independientes de socavación general progresiva durante la etapa en servicio, la socavación general súbita para el hidrograma transcurrido durante el colapso, la socavación por contracción y la socavación local en las cepas.

La Tabla 4.5 presenta un resumen de los factores relacionados a la socavación determinados para los casos de estudio.

Tabla 4.5. Casos de estudio: Socavación y factores relacionados.

Metodología	Puente	Estructura cepas	Socavación progresiva		Socavación súbita		
			Actividades antrópicas	Crecidas menores	Crecida	Escombros flotantes	Esviaje del puente
Melville y Coleman	Blackmount	Muro lleno	N/A	N/A	Sí	No	Sí
	Bulls	Muro lleno	Sí	No	Sí	Sí	Sí
	Mahitahi	Muro lleno	No	Sí	Sí	No	Sí
Wang et al.	Shuang-Yuan	Columnas	No	No	Sí (sobre la condición de diseño)	Sí	Sí
Lin et al.	Schoharie	Columnas	No	Sí	Sí	No	Sí

La Tabla 4.6 presenta la descripción de la socavación total calculada para los casos de estudio.

Tabla 4.6. Casos de estudio: Verificación para condición de diseño.

Metodología	Puente	Socavación total calculada (m)	Socavación en condición de diseño (m)
Melville y Coleman	Blackmount	7,0 m	N/A
	Bulls	12,0 m	N/A
	Mahitahi	6,0 m	N/A
Wang et al.	Shuang-Yuan	23,0 m	20,0 m
Lin et al.	Schoharie	7,5 m	~ 3,0 m

La metodología aplicada por Melville y Coleman, no especifica la socavación en condición de diseño, sin embargo, debido a la profundidad de los pilotes especificada para los casos de estudio, se infiere que fue excedida. Adicionalmente, para el caso de estudio del puente Blackmount, la documentación de proyecto indicó la dificultad de hincar los pilotes *in situ* durante la etapa constructiva, reportando que no fueron cimentados a la profundidad determinada por diseño, destacando una importante discrepancia entre diseño y obra.

La metodología aplicada por Wang et al., especifica la socavación en condición de diseño. En efecto, la socavación total calculada fue excedida únicamente con el caudal peak de crecida transcurrido durante el colapso, debido a que excedió el período de retorno de crecida en condición de diseño. Sin embargo, estudiaron la estabilidad de las cepas, empleando análisis de sensibilidad respecto de la socavación calculada para las cepas colapsadas respecto de las cepas que no colapsaron, considerando los factores relacionados a la socavación determinados con el análisis forense.

La metodología aplicada por Lin et al., especifica la socavación en condición de diseño. En efecto, la socavación total fue excedida con el caudal peak de crecida transcurrido durante el colapso debido a que el puente ya presentaba una socavación importante por el transcurso de crecidas menores durante la etapa en servicio.

4.2.6 Diagnóstico forense

La Tabla 4.7 presenta el diagnóstico forense para los casos de estudio.

Tabla 4.7. Casos de estudio: Diagnóstico forense.

Metodología	Puente	Diagnóstico forense
Melville y Coleman	Blackmount	Colapso debido a socavación ante un caudal peak de crecida con período de retorno de 50 años, intensificada por la combinación simultánea del esviaje del puente y la estructura de las cepas de muro lleno. Adicionalmente, los pilotes no fueron cimentados a la profundidad determinada por diseño, destacando una discrepancia importante entre diseño y obra.
	Bulls	Colapso debido a socavación ante un caudal peak de crecida con período de retorno de 1 año, intensificada por la combinación simultánea del esviaje del puente y el arrastre de escombros flotantes acumulados en las cepas, y por la socavación progresiva acumulada durante la etapa en servicio debido a las extracciones de áridos efectuadas durante más de 30 años.
	Mahitahi	Colapso debido a socavación ante un caudal peak de crecida asociado a período de retorno de 15 años, por la combinación simultánea del esviaje del puente y la estructura de las cepas de muro lleno, el angostamiento del cauce y por la socavación progresiva acumulada durante la etapa en servicio por la sucesión de crecidas menores.
Wang et al.	Shuang-Yuan	Colapso debido a socavación ante un caudal peak de crecida con período de retorno en condición sobre la de diseño. Adicionalmente, también se destaca la intensificación por combinación simultánea del esviaje del puente y el arrastre escombros flotantes.
Lin et al.	Schoharie	Colapso debido a socavación ante un caudal peak de crecida con período de retorno de 50 años, y por la socavación progresiva acumulada durante la etapa en servicio, destacando una crecida cercana a un período de retorno de 100 años.

4.3 Conclusiones

El análisis comparativo de los casos de estudio de los puentes colapsados por causas hidráulicas en Estados Unidos, Nueva Zelanda y Taiwán, presentaron un ajuste similar, en función del análisis forense de la metodología propuesta. El efecto, los casos de estudio corresponden a puentes colapsados por socavación ante caudales peak de crecida asociados a períodos de retorno inferiores a la condición de diseño, intensificados por la combinación simultánea de factores que contribuyeron a la socavación local debido al esviaje del puente ante cepas de muro lleno, y eventualmente, por la acumulación de escombros flotantes. Adicionalmente, presentaban la acumulación progresiva de socavación, acercándose gradualmente a la condición de diseño. Suficiente para que colapsaran simultáneamente ante caudales peak de crecidas con períodos de retorno inferiores a la condición de diseño.

CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

5.1 Discusión

El desarrollo progresivo de la socavación evidencia la falta de mantenimiento por parte de la entidad concesionaria de los puentes, por no incurrir en medidas de mitigación, o bien, por incurrir en medidas de mitigación no efectivas. Más aún, cuando es clara la evidencia de socavación mediante las batimetrías realizadas con las inspecciones periódicas y eventuales durante la etapa en servicio. Sin embargo, la entidad concesionaria de la gran mayoría de los puentes siempre corresponde a organismos estatales, en este sentido, se infiere que los miles de puentes no puedan ser inspeccionados ni efectuados con medidas de mantención de manera rigurosa.

Adicionalmente, disponer de una metodología para el análisis forense de puentes colapsados por causas hidráulicas sirve para establecer una base metodológica que pueda seguir desarrollándose en trabajos posteriores mediante la aplicación a nuevos casos de estudio. En este sentido, la validación de la metodología propuesta, para su aplicación con fines de consultoría, escapa del alcance en el presente documento.

5.2 Conclusiones

La revisión del estado del arte presenta la importancia del análisis forense de puentes debido a la complejidad de la socavación como causa de colapso, implicando múltiples factores que contribuyen al desarrollo progresivo, destacando la dificultad de relacionar objetivamente las intervenciones antrópicas durante un análisis forense.

La metodología propuesta sirve para validar (o descartar) la hipótesis de socavación como causa de colapso, señalar los factores relacionados que contribuyeron a una condición por sobre la de diseño y establecer el diagnóstico forense.

El análisis comparativo de los casos de estudio, en función de la metodología propuesta, presentó una análisis forense similar a la establecida por los autores originales.

CAPÍTULO 6: REFERENCIAS

- Álvarez, G. (2019). In-stream mining: Supporting and undermining critical infrastructure. *Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Ingeniería Civil*.
- American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO. (2020). *Standard specifications for highway bridges*. Washington D.C: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AN5, W. (1 de Abril de 1989). Crews respond to the Hatchie Bridge collapse in 1989. *WMC Action News 5*.
- Barrow, R., Anthony, R., Beasley, K., & Verhulst, S. (2018). *Guidelines for failure investigation*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.
- Benn, J. (2013). Railway bridge failure during flooding in the UK and Ireland. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 163-170.
- Briaud, J. L., Brandimarte, L., Wang, J., & D'Odorico, P. (2007). Probability of scour depth exceedance owing to hydrologic uncertainty. *Georisk*, 1(2), 77-88.
- Carper, K. (2003). Technical council on forensic engineering. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 280-296.
- Cau, B. T., Thap, N. H., & Khoi, P. V. (2003). An overview of bridge failures in Vietnam. *Forensic Engineering*, 415-422.
- Chang, F. (1973). A statistical summary of the cause and cost of bridge failures. *Federal Highway Administration, Office of Research and Development, Report No. FHWA-RD, 75-87*.
- Cigada, A., Malavasi, S., & Vanali, M. (2001). Direct force measurements on a submerged bridge model. *WIT Transactions on the Built Environment*, 56, 306-314.
- Cook, W., & Barr, P. (2017). Observations and trends among collapsed bridges in New York State. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 31(4), 04017011.
- Cook, W., & Montalvo, C. (2018). A concise analysis of hydraulic bridge collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 12, 810-815.
- Cook, W., Barr, P., & Halling, M. (2014). Bridge failure rate. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(3), 04014080.

- Deng, L., Wang, W., & Yang, Y. (2015). State-of-the-art: Review on the causes and mechanisms of bridge collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(2), 04015005.
- Diehl, T. (1997). *Potential drift accumulation at bridges*. Washington D.C: U.S Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Research and Development.
- Ead, S. A., Abdelmonem, Y., & Soliman, R. M. (2007). Scour Around Skewed Spur Dikes. *Canadian Hydrotechnical Conference*.
- Ebrahimi, M., Djordjević, S., Panici, D., Tabor, G., & Kripakaran, P. (2020). A method for evaluating local scour depth at bridge piers due to debris accumulation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 86-99.
- Ede, A., Nwankwo, C., Oyebisi, S., Olofinnade, O., Okeke, A., & Busari, A. (2019). Failure trend of transport infrastructure in developing nations: Cases of bridge collapse in Nigeria. *International Conference on Sustainable Infrastructural Development*, 640 (1) .
- Ettema, R., Mostafa, E. A., Melville, B. W., & Yassin, A. A. (1988). Local scour at skewed piers. *Journal Hydraulic Engineering*, 756-759.
- Garg, R., Chandra, S., & Kumar, A. (2020). Analysis of bridge failures in India from 1977 to 2017. *Structure and Infrastructure Engineering*, 18(3), 295-312.
- GI. (15 de Agosto de 2004). Worst hurricanes in U.S. history. *Getty Images*.
- Hai, D. T., Yamada, H., & Katsuchi, H. (2007). Maintenance, management, life-cycle design and performance. *Structure and Infrastructure Engineering*, 1-25.
- Harik, I. E., Shaaban, A. M., Gesund, H., Valli, G. Y., & Wang, S. T. (2003). United States bridge failures, 1951-1988. *Journal of Performance and Constructed Facilities*, 272-277.
- Hong, J.-H., Chiew, Y.-M., Lu, J.-Y., Lai, J.-S., & Lin, Y.-B. (2012). Houfeng bridge failure in Taiwan. *Journal of Hydraulic Engineering*, 186-198.
- Imam, B. M., & Chryssanthopoulos, M. K. (2012). Causes and consequences of metallic bridge failures. *Structural Engineering International*, 22 (1) 93-98.
- Kardon, J. (2012). *Guidelines for forensic engineering practice*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.
- Kattell, J., & Eriksson, M. (1998). *Bridge scour evaluation: Screening, analysis & countermeasures*. Washington D.C: U.S Department of Agriculture, Forest Service.

- Kerenyi, K., Sofu, T., & Guo, J. (2009). *Hydrodynamic forces on inundated bridge decks*. McLean, Virginia: US Federal Highway Administration Office of Infrastructure Research and Development.
- Ko, Y.-Y., Chiou, J.-S., Tsai, Y.-C., & Chen, C.-H. (2014). Evaluation of flood resistant capacity of scoured bridges. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 28(1), 61-75.
- Kondolf, G. (1994). Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining. *Landscape and Urban planning*, 28, 225-243.
- Kondolf, G. (1997). Hungry water: Effect of dams and gravel mining on river channels. *Environmental Management*, 21(4), 533-551.
- Lagasse, P. F., Zevenbergen, L. W., & Clopper, P. E. (2010). Impacts of debris on bridge pier scour. *International Conference on Scour and Erosion*, 854-863.
- Lane, E. W. (1955). *The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering*. Denver, Colorado: Department of the Interior Bureau of Reclamation.
- Laursen, E. M., & Toch, A. (1956). *Scour around bridge piers and abutments*. Iowa, United States: Iowa Highway Research Board.
- LeBeau, K., & Wadia-Fascetti, S. (2007). Fault tree analysis of Schoharie creek bridge collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 21(4), 320-326.
- Lewis, G. (2003). *Guidelines for Forensic Engineering Practice*. American Society of Civil Engineers.
- Lin, C., Han, J., Bennett, C., & Parsons, R. (2014). Case history analysis of bridge failures due to scour. En J. Liu, X. Zhang, & B. Huang, *Climatic Effects on Pavement and Geotechnical Infrastructure* (págs. 204-216). Fairbanks, Alaska: American Society of Civil Engineers, ASCE.
- Malavasi, S., Riva, M., & Vanali, M. (2001). Hydrodynamic forces on a submerged bridge. *Transactions on the Built Environment*, 56.
- MBNE. (4 de Enero de 2019). The water in Chorro Creek rose over 9 feet on January 4, 2019, overtopping this county bridge. *Morro Bay National Estuary*.
- Melville, B. W., & Dongol, D. M. (1992). Bridge pier scour with debris accumulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118 (9), 1306-1310.
- Melville, B., & Coleman, S. (2000). *Bridge scour*. Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publication.

- Melville, B., & Stephen E, C. (2000). Case study: New Zealand bridge scour experiences. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(7), 535-546.
- New York State Department of Transportation, NYSDOT. (2004). *Bridge safety assurance: Hydraulic vulnerability manual*. New York State Department of Transportation.
- Oudenbroek, K., Naderi, N., Bricker, J., Yang, Y., van der Veen, C., Uijtewaal, W., . . . Jonkman, S. (2018). Hydrodynamic and debris damming failure of bridge decks and piers in steady flow. *Geosciences*, 8(11), 409.
- Richardson, E., & Davis, S. (2001). *Evaluating scour at bridges*. Washington D.C: U.S Federal Highway Administration Office of Bridge Technology.
- Robertson, I. N., Riggs, H., Yim, S. C., & Young, Y. L. (2007). Lessons from hurricane Katrina storm surge on bridges and buildings. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 464-483.
- Smith, D. (1976). Bridge failures. *Proceedings of the Institutions of Civil Engineering*, 60(3), 367-382.
- Storey, C., & Delatte, N. (2003). Lessons from the collapse of the Schoharie creek bridge. *Forensic Engineering*, 158-167.
- Tan, J.-S., Elbaz, K., Wang, Z.-F., Shen, J. S., & Chen, J. (2020). Lessons learnt from bridge collapse: A view of sustainable management. *Sustainability*, 12 (3).
- USGS. (4 de Junio de 1997). Flooding of the Sorlie Bridge. *United States Geological Survey*.
- Wang, C.-Y., & Wang, H. (2012). Performance of bridges in Taiwan under extreme typhoon induced multiple hazards. *Taiwan-Japan Bridge Workshop*, 47-67.
- Wang, C.-Y., & Wang, H. (2012). Performance of bridges in Taiwan under extreme typhoon-induced multiple hazards. *Taiwan-Japan Bridge Workshop*, 47-67.
- Wang, H., Hsieh, S.-C., Lin, C., & Wang, C.-Y. (2014). Forensic diagnosis on flood-induced bridge failure I: Determination of the possible causes of failure. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 28(1), 76–84.
- Wardhana, K., & Hadipriono, F. (2003). Analysis of recent bridge failures in the United States. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 17(3), 144-150.
- Wirkijowski, D., & Moon, F. L. (2020). Identifying characteristics of bridges vulnerable to hydraulic hazards using bridge failure data. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34 (6).

- Wu, T.-R., Wang, H., Ko, Y.-Y., Chiou, J.-S., Hsieh, S.-C., Chen, C.-H., . . . Chuang, M.-H. (2014). Forensic diagnosis on flood-induced bridge failure II: Framework of quantitative assessment. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 28(1), 85-95.
- Xu, F. Y., Zhang, M. J., Wang, L., & Zhang, J. R. (2016). Recent highway bridge collapses in China: Review and discussion. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30 (5).
- Yang, Y., Melville, B. W., Sheppard, D. M., & Shamseldin, A. Y. (2018). Clear water local scour at skewed complex bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144 (6).
- Yang, Y., Xiong, X., Melville, B., & Sturm, T. (2020). Dynamic morphology in a bridge-contracted compound channel during extreme floods: Effects of abutments, bed-forms and scour countermeasures. *Journal of Hydrology*, 594, 125930.

CAPÍTULO 7: ANEXOS

7.1 ANEXO I. Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Seleccione a cuál de los 17 ODS contribuye su trabajo de Memoria de Título:

- ODS-1 : Fin de la pobreza.
- ODS-2 : Hambre cero.
- ODS-3 : Salud y bienestar.
- ODS-4 : Educación de calidad.
- ODS-5 : Igualdad de género.
- ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ODS-7 : Energía asequible y no contaminante.
- ODS-8 : Trabajo decente y crecimiento económico.
- ODS-9 : Industria, innovación e infraestructura.
- ODS-10 : Reducción de las desigualdades.
- ODS-11 : Ciudades y comunidades sostenibles.
- ODS-12 : Producción y consumo responsables.
- ODS-13 : Acción por el clima.
- ODS-14 : Vida Submarina.
- ODS-15 : Vida de ecosistemas terrestres.
- ODS-16 : Paz, justicia e instituciones sólidas.
- ODS-17 : Alianzas para lograr los objetivos.

Vinculación

La contribución a los Objetivos de Desarrollo Sustentable se vincula a la industria, innovación e infraestructura, debido a que el objetivo principal es establecer una metodología de análisis forense de puentes colapsados por causas hidráulicas. En efecto, determinar las causas de colapso de un puente mediante análisis forense contribuye a la adjudicación de los errores cometidos y la atribución de la responsabilidad a las partes involucradas, y finalmente, conjuntamente al análisis estructural, geotécnico y de transporte, proponer el diseño para las reparaciones adecuadas.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil
Carrera : Ingeniería Civil
Nombre del memorista : Roberto Andrés Sáez Gatica
Título de la memoria : Metodología de análisis forense de puentes colapsados por causas hidráulicas
Fecha de la presentación oral :

Profesor(es) Guía : Dr. Oscar Link Lazo
Profesor(es) Revisor(es) : Dr. Rodrigo Silva Muñoz
Concepto :
Calificación :

Resumen

El colapso de un puente por causas hidráulicas ocurre cuando se excede la cota de aguas máximas por sobre la revancha determinada, o bien, cuando se excede la profundidad de socavación total. La primera situación se presenta para crecidas mayores a la crecida de diseño. Sin embargo, la segunda situación no se presenta necesariamente para crecidas mayores a la crecida de diseño. En efecto, el desarrollo progresivo de la socavación puede derivar en el colapso de un puente simultáneamente ante un evento de crecida menor. En este caso, determinar la causa de colapso del puente requiere análisis forense. El análisis forense no se rige por normativas oficiales, sin embargo, en la práctica, se aplican procedimientos rigurosos, identificados a partir de casos de estudio de literatura de ingeniería forense. El presente documento, tiene por objetivo general establecer una metodología de análisis forense de puentes colapsados por causas hidráulicas.

Se propuso una metodología de análisis forense de puentes colapsados por causas hidráulicas considerando inspección *in situ*, evaluación de hidrograma, estimación de la cota de fondo, análisis de la estabilidad del cauce y verificación de la condición de diseño, a fin de validar (o descartar) la hipótesis de causas hidráulicas como la causa de colapso, señalar los factores relacionados que contribuyeron a una condición por sobre la de diseño y establecer el diagnóstico forense.

Se analizaron comparativamente casos de estudio de puentes colapsados por causas hidráulicas en Estados Unidos, Nueva Zelanda y Taiwán, en función de la metodología propuesta. En efecto, el procedimiento establecido por la metodología propuesta presentó un ajuste similar a los procedimientos establecidos en los casos de estudio.

La metodología de análisis forense de puentes colapsados por causas hidráulicas establecida en el presente documento requiere ser validada mediante aplicaciones que no se realizaron para este trabajo.