

Socavación de puentes

Edgar Muñoz, M.S.c, Profesor e investigador
Ing. Edgar Valbuena, Joven investigador
Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana.
Bogotá, Colombia, Carrera 7 No. 40-62

Resumen

En el presente artículo se expone la problemática de la socavación en los puentes de la Red Vial de Colombia, basados en los módulos de inventario e inspección principal del Sistema de Administración de Puentes de Colombia (SIPUCOL), implementado desde 1996 por parte del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). SIPUCOL ha sido una herramienta esencial para mantener la seguridad y el funcionamiento de los puentes en Colombia. Con base en la información de este Sistema se presentan los daños típicos de estas estructuras por problemas de socavación, de acuerdo con las labores de inspección, mantenimiento, ejecución de estudios y obras de rehabilitación. El documento incluye casos de colapsos de puentes, cuya principal causa ha sido la socavación. Para evitar el riesgo de falla de los puentes por causa de la socavación, que es un problema complejo, se hacen algunas recomendaciones de inspección, contenido mínimo de los estudios especializados y de las labores de investigación.

Palabras claves: Socavación local, socavación general, daño e inspección.

Abstract

In the present paper an evaluation of scour problems bridges of the Colombian National Highways has been developed; based on the principal inspection and inventory module of the Colombian Bridge Administration System (SIPUCOL), which has been

implemented since 1996 by the National Highways Institute (INVIAS).

SIPUCOL has been an essential tool to maintain security and functionality of Colombian bridges. This article presents the amount, evolution and classification of damages, based on visual inspections, maintenance, studies performance and rehabilitation works

In this document it has been included all the collapsed bridges which main cause of collapse has been scour. To prevent bridges failure risks, taking into account that scour is a complex problem, some recommendations have been made about of the inspection methodology, the study's quality and the analytic research implementation.

Key Words: local scout, general scout, damage, inspection.

1. Introducción

El mayor daño en la infraestructura de los puentes de la Red Vial Nacional que cruzan los ríos ocurre durante las crecientes, producido por la socavación de la fundación de los estribos y/o pilas. Este daño puede variar desde erosiones en las bancas y los terraplenes de acceso hasta la falla completa de la estructura del puente o su terraplén de acceso. En una investigación reciente sobre la evaluación de las causas de colapso de algunos puentes en Colombia, basada en el estudio de sesenta y tres (63) casos de fallas totales y parciales (Muñoz, Edgar, 2000), se encontró que el

70% se producen por fenómenos hidráulicos, tales como socavación y avalanchas (ver Figura 1).

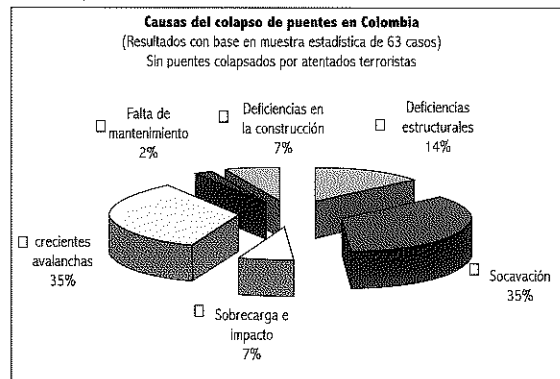


Figura 1. Estadística de la causa de colapso de algunos puentes en Colombia

En Colombia, las entidades públicas responsables de la administración de las obras de infraestructura vial están preocupadas por el problema y tienen proyectado incrementar la investigación sobre el tema, con el objeto de buscar soluciones de controlar este fenómeno y disminuir el riesgo de colapso de puentes. En una investigación del Work Consultancy Services (1990) se encontró que el costo capital de las facilidades temporales requeridas luego del colapso y antes de la reconstrucción total del puente nuevo (puentes provisionales, mejoramiento de las rutas alternativas para el tráfico desviado) es 50 % mayor que el costo de remplazar el mismo puente y sus terraplenes de acceso, antes de que colapse.

La socavación consiste en la disminución del nivel del lecho por la erosión del agua con una tendencia a exponer la fundación del puente. En la actualidad no existe una metodología unificada que permita a los diseñadores y constructores estimar con seguridad la profundidad de socavación en puentes. Esta carencia se debe a la complejidad del problema y a su misma variación durante el corto plazo en el cual se produce la degradación, donde los flujos son inestables y las características dinámicas y geométricas son complejas; la corriente interactúa con mezclas variadas de sedimentos cuyos rangos van desde arenas aluviales

hasta arcillas y rocas meteorizadas; es claro que durante una creciente sus características pueden cambiar drásticamente y de manera aleatoria. El problema a menudo se complica por la gran variedad de formas, alineamientos y posiciones usadas para pilas y estribos y por la presencia de desechos flotantes y basuras atrapadas que cambian la geometría y el patrón del flujo.

Existen muchas investigaciones sobre socavación alrededor del mundo, y se han publicado numerosas fórmulas para predecir su valor tanto en suelos granulares como en suelos cohesivos. Los valores estimados con esas fórmulas varían ampliamente, ya que, como se mencionó anteriormente, la extrema complejidad del fenómeno, hace que los estudios experimentales consideren ciertos aspectos del problema como constantes. Por tal razón resulta indispensable que se conozca las limitaciones y los rangos de aplicación de las metodologías que se van a utilizar para que no se obtengan valores que puedan poner en peligro la estructura o que resulte en una fundación extremadamente costosa (Valbuena, et.al, 2003).

A continuación se hace una breve descripción del Sistema de Administración de Puentes de Colombia (SIPUCOL) y la forma como se ha manejado el tema de la evaluación de la socavación de los puentes. Además los daños típicos detectados en la infraestructura de los puentes producidos principalmente por este fenómeno. Las reparaciones estándar ejecutadas, los estudios de consultaría especializados y algunas de las obras especiales llevadas a cabo. Por último algunas recomendaciones para complementar la inspección visual de puentes con problemas de socavación.

2. Antecedentes

Son muchos los casos de colapsos y fallas de puentes vehiculares por socavación en Colombia, problema que debe ser objeto de reflexión y análisis por parte

de la Ingeniería Nacional. Existen diferentes modelos que se pueden usar para calcular las pérdidas monetarias indirectas causadas por el colapso o cierre temporal de un puente [Young, et al. (1993), Rodhes & Trent (1993) y Stein, et., al. (1999)], donde se ha demostrado que en algunos casos (Colapso del Schoharie Creek 1987, Colapso de puentes en West Virginia, etc) el costo de la reconstrucción del puente es solo el 20% de las pérdidas totales generadas.

En Colombia los puentes que han fallado por este fenómeno, no tuvieron en su etapa de diseño un estudio hidrológico e hidráulico, ya que el criterio fundamental de diseño de la cimentación obedeció más a la capacidad portante, que a la socavación probables. En la Tabla 1 se presenta un listado de los puentes en Colombia que han fallado o colapsado por socavación y fenómenos hidráulicos asociados desde el año 1986. En algunos de ellos no se conoce toda su

#	Fecha del colapso / Falla parcial	Nombre del puente	Localización - Carretera	Longitud Total (m)	Número de luces	Descripción de la estructura
1	Jun-86	Cúcuta - Caño Limón (La Leña - Saravena)	Cúcuta - Caño Limón (La Leña - Saravena)	130	1	Puente de armadura en acero de paso superior gigante. Tablero mixto en concreto y acero
2	May-93	El Limón	Unibe - Ye Granada	60		Provisional bailey - colgante
3	May-94	El Guajiro	Bunavista - Maicao	31,6	1	Sistema de vigas y losa en concreto preesforzado. Simplemente apoyado
4	May-94	Guillermo León Valencia	Mesetas - Granadas (Río Ariari)	1000	9	Puente en acero (98, 133.5, 133.5, 95.5, 45, 95.5, 133.5, 133.5, 98)
5	May-94	Barranca de Upiá	Villavicencio - Barranca de Upiá	342	6	Provisional Bailey (sin colgar)
6	Jul-94	Río Casanare	Río Ermitaño - La Lízama			
7	Jul-94	Río Carare	Troncal de la Paz Municipio de Cimitarra en Santander	267		Puente en Concreto
8	Nov-94	San Luis	Cúcuta - Tachira (Venezuela)		2	
9	Nov-94	Río Pató	Huquí - La Ye	52	7	Estructura de viga y losa en concreto preesforzado
10	Jun-95	El Secreto	Guateque - El Secreto	350	2	Provisional Bailey - colgante
11	Abr-96	Sabandija	Ibagué - Mariquita	76		Puente metálico de armadura de paso a través y tablero mixto en concreto y acero
12	Nov-96	Jorge Gaitán Durán	Sobre el río Pamplonita de Cúcuta		1	Puente de varias luces con sistema de vigas en concreto preesforzado y losa en concreto reforzado
13	Ago-97	Malanzas	Neiva - Balsillas	24,7		Puente en concreto reforzado
14	Feb-99	Bugalagrande	Bugalagrande (Valle del Cauca)		1	
15	Nov-99	La Gómez	La Lízama - San Alberto	22,35	2	Concreto preesforzado
16	Jun-00	Unete		70	1	Puente de acero de armadura de paso a través, con tablero mixto de concreto y acero
17	Jul-00	Guaduas - Cabezas	Sogamoso - Agua Azul	18	1	Provisional Mabey
18	Sep-00	Tobasía	Turija - Miraflores - Paez	14	1	Armadura de paso a través, simplemente apoyado
19	Ene-03	Cravo Sur	Labranzagrande - Sogamoso - Yopal	101		Armadura de paso a través, colgante
20	Jun-03	Nuevo Presidente	Tibú - Cúcuta			
21	Ago-03	Hormiguero	Puerto Tejada - Cali			
22	Sep-03	Ospina Hato Viejo	San Cayetano - Durania			Puente sobre la quebrada Ocareña (Norte de Santander)
23	Oct-03	Santa Isabel	La Mata - San Roque	10,5	1	Puente de losa y 3 vigas en concreto reforzado, simplemente apoyado
24	Oct-03	Pauto	Yopal - Pore			
25	Nov-03	Anímilo	La Mata - San Roque	45,9	1	Puente de losa y 4 vigas en concreto preesforzado, prefabricado in situ
26	Dic-03	Quebrada Pozo Ronco	Cartagena - Barranquilla	1	1	
27	Ene-04	Majumba	Río Caranal (Arauca)	180	6	Losa y 2 vigas, simplemente apoyado en concreto
28	Abr-04	Guamal	Guamal - San Martín	156,35	5	Puente sobre el río Guamal (Meta). Puente de armadura de paso superior
29	May-04	Puente Simi	Chiriguana - Curumani			
30	Jun-04	Vanadia	La Cabuya - Saravena (Casanare)	72,35	2	Puente de losa y 2 vigas en concreto reforzado, simplemente apoyado
31	Sep-04	Quebrada Lopeño	Tame - Saravena (Casanare)	40,8	1	Puente de losa y 2 vigas en concreto reforzado, simplemente apoyado
32	Sep-04	Guaduas - Cabezas	San Alberto - La Mata	18,3	2	Puente en concreto reforzado
33	Sep-04	Quebrada Gualabao	La Cabuya - Saravena (Casanare)			
34	Sep-04	Cobará	La Leña - Saravena	130		
35	Sep-04	Tocoragua	La Cabuya - Saravena (Casanare)	30,4	1	Puente de losa y 2 vigas en concreto reforzado, simplemente apoyado
36	Feb-05	Internacional la Unión	Puerto Santander (Col) - Venezuela	39	1	Puente provisional tipo Bailey
37	Mar-05	Sabaletas	Buenaventura (Valle del Cauca)	13,6	1	Concreto reforzado

Tabla 1. Listado de los puentes que han fallado parcialmente o colapsado por socavación en Colombia

información, por pertenecer a carreteras secundarias y terciarias.

En las Foto 1, Foto 2 y Foto 3 se presentan ejemplos de colapsos de tres (3) de los puentes de la Red Vial Nacional. En el puente Unete falló el estribo por socavación lateral, su solución consistió en nivelar el estribo con ganeo y construir micropilotes en la cimentación del mismo. En el puente Jorge Gaitán Durán colapsó su pila dos (2) veces, siendo la solución definitiva eliminarla y construir un puente en acero que cubriera las dos (2) luces que soportaba la misma. En el puente Sabandija falló parcialmente su estribo, por la inestabilidad de la aleta al producirse una creciente que la afectó. La solución consistió en la construcción

de una nueva luz detrás de este estribo, con lo cual se mejoró el área hidráulica y se eliminó el efecto de socavación.

3. Sistema de administración de puentes de Colombia (SIPUCOL)

Para estudiar el problema de socavación de los puentes en Colombia, se empleó información del Sistema de Administración de Puentes de Colombia (SiPuCol), implementado desde 1996 por el Instituto Nacional De Vías (Invias) con la asesoría del Directorado de Carreteras de Dinamarca. Este sistema incluye la evaluación de la socavación en los puentes y tiene los siguientes alcances:

- Predicción de las necesidades de mantenimiento y de los fondos requeridos.
- Elaboración de listados de puentes por prioridades de rehabilitación.
- Identificación de puentes con restricciones o limitaciones de servicio.
- Búsqueda de la mejor alternativa de rehabilitación desde el punto de vista técnico y de costo-beneficio.
- Cuantificación de los costos de inversión por puente.
- Determinación de la capacidad de carga de los puentes y sus restricciones.

En la Figura 2 se presenta un organigrama que explica en forma resumida la metodología para lograr los alcances antes planteados, en la cual se identifica el



Foto 1. Falla de estribo del Puente Unete (Casanare)



Foto 2. Colapso del puente Jorge Gaitán Durán. (Norte de Santander)

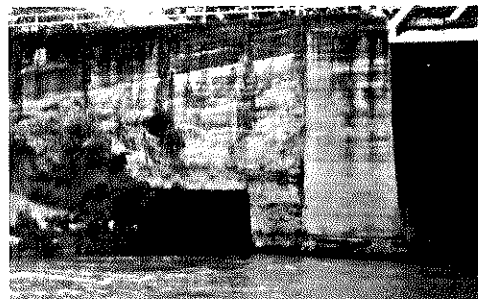


Foto 3. Socavación en estribo y posterior colapso parcial. Puente Sabandija - Regional Tolima

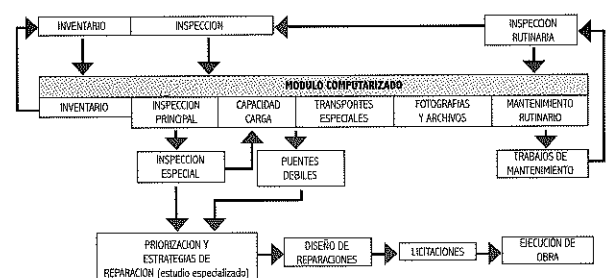


Figura 2. Módulos del Sistema de Administración de Puentes (Sipucol)

procedimiento de priorización y la toma de decisiones para la reparación de los puentes

El sistema identifica los puentes en estado crítico y prioriza de acuerdo con los resultados de la inspección principal, inspección especial, inspección rutinaria, el tránsito promedio diario y la capacidad de carga. Dependiente del daño o vulnerabilidad detectada, se ejecutan obras de emergencia para evitar colapsos, posteriormente se realizan estudios especializados y por último el diseño de obras de reparación definitivas. A continuación se hace una breve descripción de los módulos principales que conforman este sistema:

Inventario: Contiene información seleccionada sobre localización, administración, geometría, tipologías de la infraestructura y superestructura, capacidad de carga, etc., para cada uno de los 2100 puentes que integran la Red Nacional de Carreteras (Instituto Nacional de Vías, et.al, 1996 a). Para el caso de la evaluación de la socavación el inventario incluye los datos de la cimentación tanto de estribos y pilas.

Inspección Principal: Tiene por objeto realizar para cada puente, una inspección visual de cada uno de los componentes principales (superficie, barandas, bordillos, andenes, vigas, losas, pilas, estribos, apoyos, armaduras, cauces y otros) que hacen parte de la estructura y dar una calificación basada en una escala cualitativa previamente definida (Instituto Nacional de Vías, et.al, 1996a). En la figura 3 se presenta las etapas necesarias para una inspección principal, que incluye: definición de los componentes, escala de calificación y los tipos de daños. Mediante este modulo se identifican los puentes que requieren de inspecciones especiales, estudios especializados y reparaciones. El estado general se basa en la calificación del componente "puente", el cual se obtienen de la mayor calificación de los componentes clasificados como estructurales.

Inspección especial: Son auscultaciones profundas de la estructura que incluyen ensayos destructivos y no

destructivos especializados en campo y en laboratorio (Instituto Nacional de Vías, et.al, 1996 a). Inviás cuenta con un laboratorio móvil con equipo especializado para la realización de diagnósis del concreto y acero. Cuando hay problemas de socavación se recomiendan estudios hidrológicos e hidráulicos.

Capacidad de carga: Este módulo pretende identificar los puentes débiles y servir de herramienta en la administración de permisos para cargas especiales. (Instituto Nacional de Vías, et.al, 1996^a).

Inspección rutinaria, mantenimiento rutinario y limpieza de puentes: La inspección rutinaria incluye una frecuente revisión superficial de la estructura con el propósito de garantizar la seguridad del tránsito a diario y registrar las necesidades de mantenimiento rutinario y limpieza en los puentes (Instituto Nacional de Vías, et.al, 1996a). Mediante los administradores viales permite establecer políticas de mantenimiento menor y limpieza.

Diseño de reparación y refuerzo. Cubre la evaluación de daños, estrategias de reparación y diseño de reparación. Suministra recomendaciones sobre la toma de decisiones para las reparaciones y rehabilitaciones de los puentes, basados en las inspecciones principales, especiales y capacidad de carga. (Instituto Nacional de Vías, et.al, 1996a).

Priorización de obras de reparación y refuerzo: Explica detalladamente el procedimiento de la priorización y como se aplica a la administración de los puentes. Este módulo permite la asignación óptima de recursos para las obras de reparación. (Instituto Nacional de Vías, et.al, 1996a).

Se presentan a continuación la problemática identificada de este fenómeno, basados en la base de datos del modulo de inventario e inspección principal de SIPUCOL.

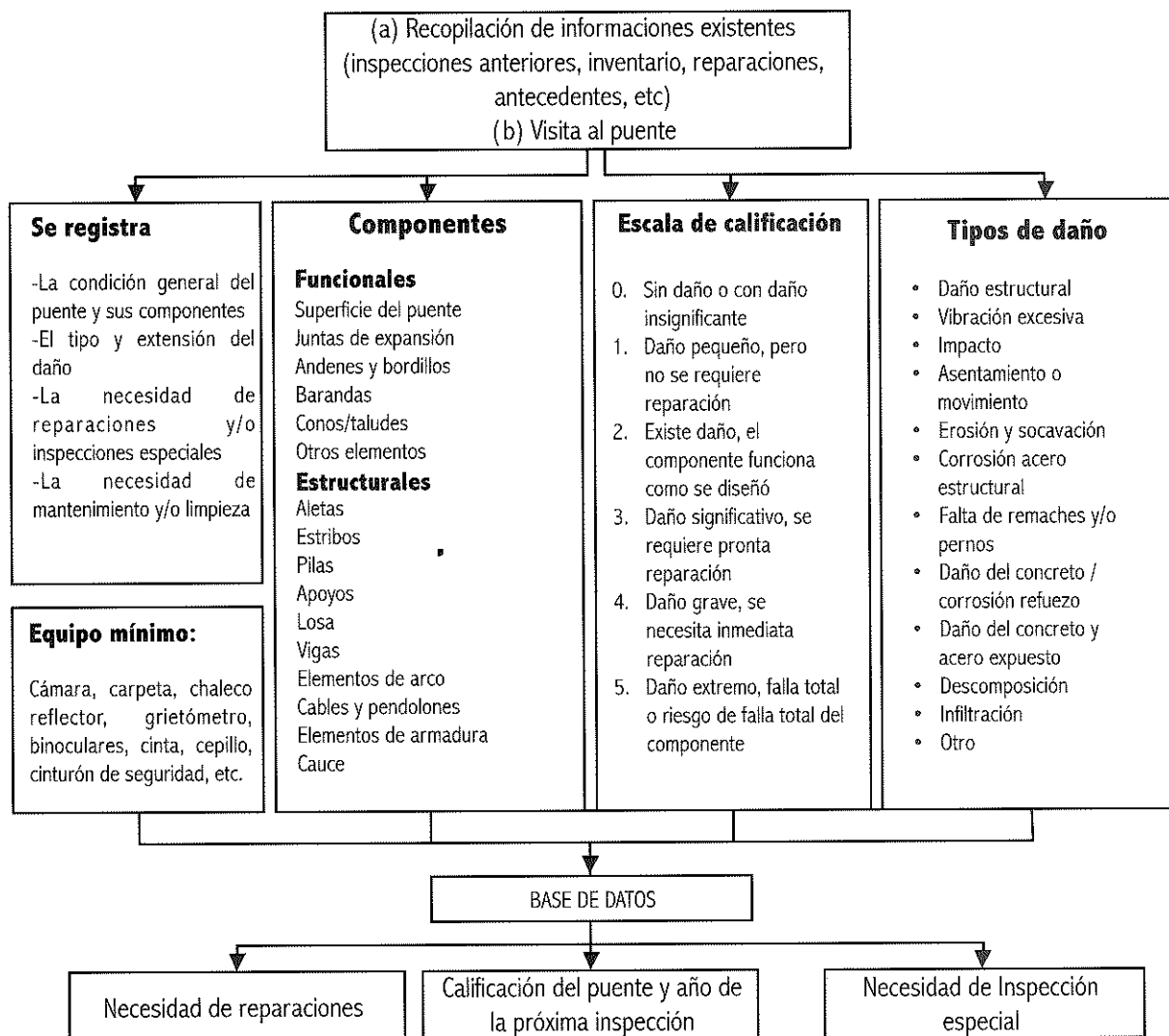


Figura 3. Etapas de la inspección principal

3.1 Módulo de inventario

Para la evaluación general de la socavación de los puentes que hacen parte de la Red Vial Nacional es importante conocer la tipología de la cimentación de sus pilas, estribos, aletas y terraplenes de acceso. La Red Vial Nacional de carreteras de Colombia administra un total 2297 puentes, de los cuales el 69% son de una sola luz (simplemente apoyada) y el 31% son iguales y mayores a una luz (Ver Figura 4). Lo anterior indica que 1585 puentes tienen solamente estribos y 712 tienen estribos y pilas. La mayor parte de los problemas de socavación se han presentado

en los estribos y terraplenes de acceso, por un área hidráulica insuficiente, lo cual coincide con los datos de inventario, donde la mayoría de puentes son de una sola luz que varían entre 10 y 25 metros.

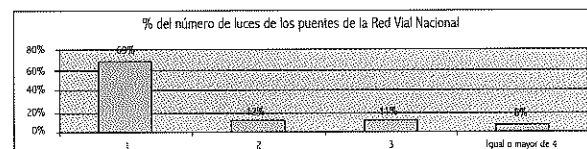


Figura 4. Porcentaje del número de luces de los puentes de la Red Vial Nacional

En las Figura 5 y Figura 6 se presentan los tipos de cimentación de estribos y pilas. El 82% de los estribos

tienen cimentaciones superficiales y solamente el 13% tienen cimentaciones profundas. Como se mencionó antes en muchos casos la decisión del tipo de cimentación se basó solamente en la capacidad portante sin incluir la probable socavación lateral en este tipo de estructuras.

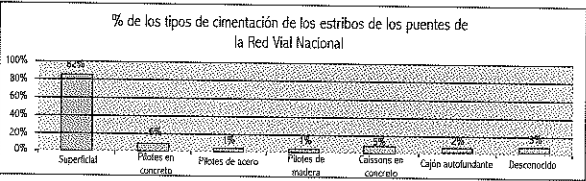


Figura 5. % de los tipos de cimentación de los estribos de los puentes de la Red Vial Nacional

El 43% de las pilas de los puentes de Colombia tienen cimentación superficial, el 32% cimentación profunda y un 25% son de otro tipo y desconocidas. Generalmente estas cimentaciones fueron concebidas para soportar solamente las cargas verticales del puente, sin incluir los efectos sísmicos y la probable socavación general y local. Uno de los inconvenientes es el desconocimiento del tipo de cimentación en las pilas, cuando se esta en el proceso de inspección y rehabilitación. Esto genera una incertidumbre que puede aumentar el costo de la rehabilitación y actualización de la cimentación para soportar efectos de sismo y problemas de socavación. Por esto es importante la implementación del módulo de inventario y su constante actualización acompañada con un modulo de archivo que guarde la historia de cada puente; labor que viene trabajando el INVIAS a partir de la implementación de SIPUCOL.

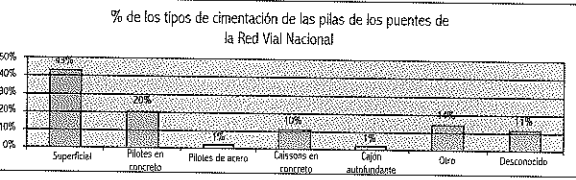


Figura 6. % de los tipos de cimentación de las pilas de los puentes de la Red Vial Nacional

El 42% de los puentes de la Red Vial Nacional tienen esviajamiento, que corresponde al ángulo con

respecto al eje paralelo del tablero, que es importante para orientar los estribos y las pilas paralelamente con las líneas de flujo del cauce y precisamente evitar problemas de socavación. Así mismo el 16% de los puentes son curvos, aspecto importante en la evaluación del comportamiento hidráulico de la cimentación de la infraestructura, ya que la forma y localización de los dados de las pilas es una de las variables importantes para la determinación de las profundidades de socavación.

3.2. Daños típicos detectados por la inspección principal

Con el objetivo principal de evaluar el estado de los las cimentaciones de las pilas y estribos, la estabilidad de las márgenes (aguas arriba y abajo) y los terraplenes de acceso, se estableció el componente “cauce” de cada puente, dentro de SIPUCOL empleando la metodología que se observa en la Figura 3. Como se mencionó antes, esto incluye una calificación cualitativa de 0 a 5 (ver escala en Figura 3), el tipo de daño, las necesidades de estudios especializados y las reparaciones necesarias a corto, mediando o largo plazo. En la Tabla 2 se presentan los resultados del estado de este componente, de acuerdo a las inspecciones visuales realizadas en diferentes períodos (1996-1997 y 2001-2002) por parte del INVIAS.

		Períodos	
		1996-1997	2001-2002
Tipos de daños	Daño estructural	0,6%	0,4%
	Asentamiento	0,8%	0,5%
	Erosión y socavación	75,5%	70,3%
	Otros	23,1%	28,8%
Estado	Riesgo bajo (0-1-2)	85,6%	90,7%
	susceptible (3)	10,2%	7,5%
	Crítico (4-5)	3,1%	1,0%
	Sin inspección?	1,0%	0,8%
Estudios especializados de hidráulica, hidrología y socavación		13,0%	19,3%

Tabla 2. Estado del componente “cauce” de acuerdo con SIPUCOL

Esta metodología de inspección visual no certifica en un 100% el conocimiento del estado del puente ante el fenómeno de socavación, solamente suministra una información inicial para solucionar parte del problema. Como complemento y para evitar riesgos el INVIAS realiza inspecciones rutinarias y de mantenimiento, mediante administradores viales y un grupo de microempresarios que siempre se encuentran en la vía. Para esto es importante inspeccionar en épocas de invierno y verano para observar los cambios del comportamiento del cauce contra el tiempo. En la Figura 7 se exponen los diferentes tipos de socavación, que en general son: socavación general, socavación por contracción y socavación local. En la Figura 8 se presenta un esquema que muestra los diferentes tipos de socavación en un puente típico.

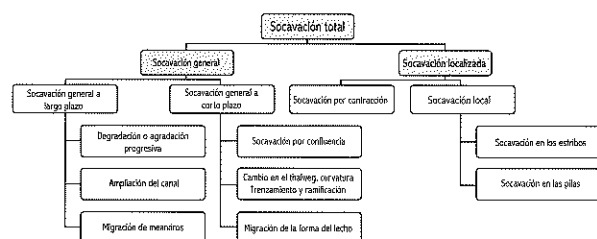


Figura 7. Tipos de socavación (Adaptada de Melville & Coleman 2000)

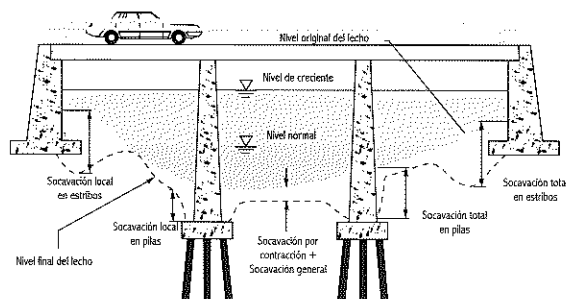


Figura 8. Tipos de socavación que pueden ocurrir en un puente

De acuerdo con la experiencia adquirida mediante inspecciones visuales empleando la metodología de SIPUCOL, se expone a continuación los diferentes tipos de daños detectados producidos por socavación y erosión. Esto se constituye en una guía complementaria de inspección visual para los futuros ingenieros inspectores, la cual debe ser complementada con cada experiencia en el tema adquirido.

Obstrucción del cauce

Se han encontrado obstrucciones en los cauces por presencia de vegetación, ramajes o escombros o por invasión del mismo. Estas basuras flotantes cambian los patrones del flujo, aumentado la velocidad y la capacidad de arrastre del cauce generando en muchos casos insuficiencia hidráulica tanto en altura como en longitud (Ver Figura 9) (b). Este problema se soluciona provisionalmente con las labores constantes de mantenimiento, retirando los escombros.

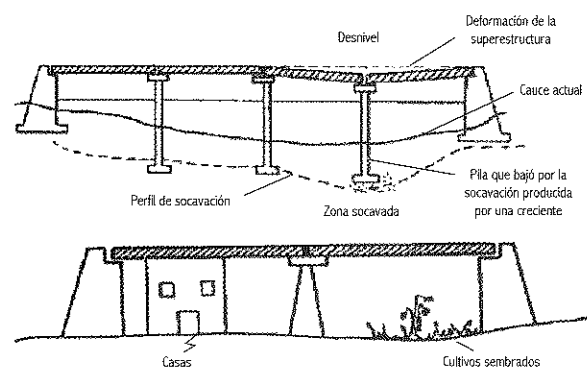


Figura 9. (a) Asentamiento por socavación en pilas (b) Obstrucción del cauce.

Fuente: Manual de Inspección Especial de SIPUCOL del INVIAS

Mala orientación en el puente (Esvijamiento)

Hay problemas de socavación cuando hay un ángulo alto de ataque de la corriente o de incidencia a la infraestructura del puente. La corriente ataca lateralmente las pilas y estribos reduciendo el ancho efectivo del cauce (ancho total menos el ancho de la proyección de los obstáculos), y por lo tanto se aumenta la velocidad de la corriente y se incrementa la profundidad de la socavación. Algunos puentes cumplen con este ángulo de esviamiento, como se observó en la estadística mostrada en el Módulo de Inventario, otros no por el cambio geomorfológico que ha sufrido las márgenes y líneas de flujo de cauce en el tiempo.

Identificación de grietas en la infraestructura

Algunas de las grietas que se presentan en las pilas y en los estribos son producidas por el fenómeno de la socavación, tales como:

a) Grietas verticales en la unión del estribo y aleta:

Producidas por socavación en la cimentación de las aletas en voladizo, lo que introduce esfuerzos en la estructura que se manifiesta con la presencia de grietas verticales y su desplazamiento. Esto combinado generalmente con asentamientos producidos en la cimentación de las aletas y el sub - diseño de la misma para soportar las presiones de tierra (ver Foto 6).

b) Grietas oblicuas en las pilas.

Mediante un análisis detallado de las grietas se determina, si son por socavación o por asentamientos diferenciales. Las pilas al ser socavadas y quedar sus cimientos parcialmente asentados en el suelo de fundación, producen una concentración de esfuerzos en la base de la pila y se genera un momento que se manifiesta con la presencia de grietas en la misma.

c) Grietas diagonales o verticales en los estribos.

Las grietas diagonales que aparecen en los estribos son ocasionadas por sismos o por socavación. Un análisis detallado de las mismas y su seguimiento especialmente después de las épocas de crecientes permiten deducir efectivamente si son ocasionadas por socavación (Ver Foto 5)

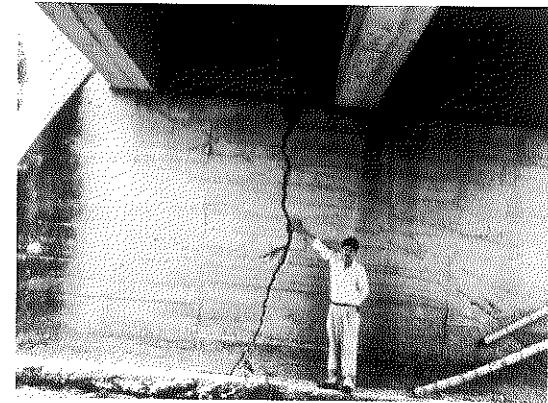


Foto 5. Grieta en estribo por socavación de la cimentación superficial y la falta de capacidad de carga

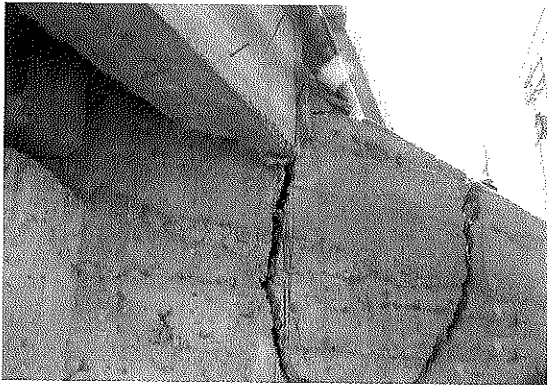


Foto 6. Grietas en la aleta por asentamientos y socavación. Puente Venecia en Boyacá

Socavación general, local y por contracción.

La socavación total se refiere a la profundidad total de socavación en la fundación de un puente en particular, incluye la socavación general y la socavación localizada. La socavación general ocurre sin importar la existencia del puente, e incluye la socavación a largo y corto plazo. La socavación general a largo plazo es la que ocurre en una escala de tiempo de varios años o décadas, e incluye la degradación o agradación progresiva y la erosión lateral debido al ensanchamiento del canal o la migración de meandros.

La degradación progresiva es la disminución general casi permanente del lecho del río en el sitio del puente debido a los cambios naturales (hidrológicos, geomorfológicos) en la cuenca como por ejemplo los cortes de cuellos (cut-offs), deslizamientos, flujos, incendios, cambios climáticos, etc., o las actividades del hombre como el dragado del canal, rectificación, cortes de cuellos, minería en el lecho, construcción de presas, urbanización, deforestación, actividad agrícola o ganadera, etc.

La agradación progresiva (sedimentación) es el incremento general del lecho en el sitio del puente, combinado con una insuficiente área hidráulica, por el inadecuado galibo o luz del puente. Esto se ha encontrado en diversos puentes de la Red Vial Nacional, como se observa en las Fotos 7 y Fotos 8.

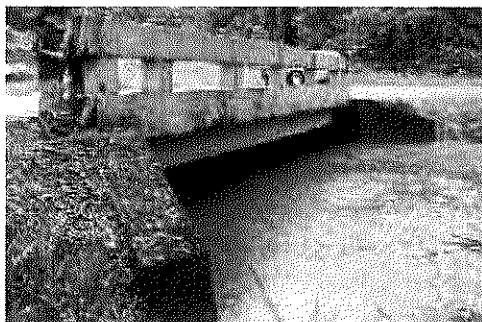


Foto 7. Agradación progresiva con posibilidad de subemergencia.
Puente Agua Clara (Chocó)



Foto 10. Problemas de contracción del flujo. Puente Mariano Ospina
Pérez (Valle)

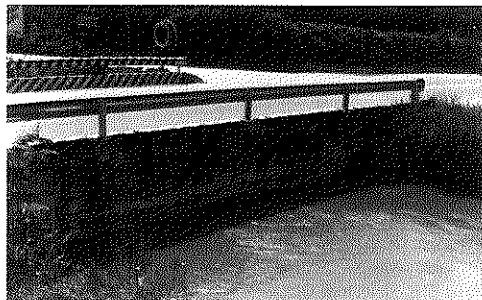


Foto 8. Problemas de agradación en el canal. Insuficiencia hidráulica

La socavación general a corto plazo es la que se desarrolla durante una o varias crecientes cercanas en el tiempo, e incluye la socavación en la confluencia, el cambio en la vaguada (thalweg) o curvatura del canal, trenzamiento, ramificación y socavación por la migración del lecho (Ver Foto 9).

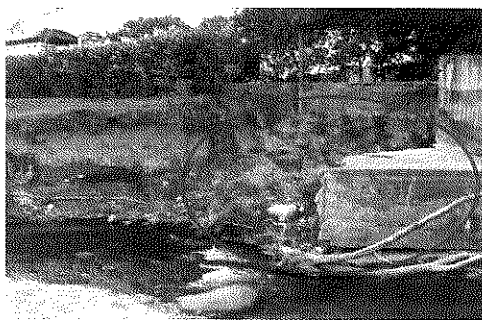


Foto 9. Socavación en terraplén de acceso por cambio en la dirección
del flujo. Puente La Conejera (Antioquia)

La socavación por contracción es la que ocurre debido al estrechamiento del flujo por la fundación del puente (incluyendo las aproximaciones), como se observa en la Foto 10. La socavación local es la causada por la interferencia de la fundación del puente con el flujo, e incluye la socavación en estribos y en pilas.

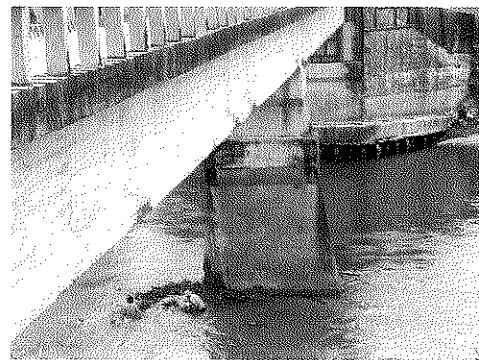


Foto 11. Puente Banadia. (Casanare) Puente que colapsó
recientemente por socavación

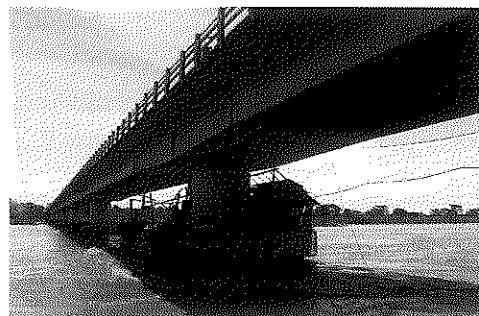


Foto 12. Puente Argelino Durán Quintero (Santander)

Indicios de socavación

Este indicio se presenta cuando se observa que se han desnivelado o descendido los estribos o las pilas por efecto de una creciente (Ver Foto 13). El desnivel producido en el puente generalmente no es uniforme, e induce a la superestructura esfuerzos que la hacen deformar tanto en el sentido vertical como en el horizontal. La magnitud de esta falla puede ser tan grande que puede dejar al puente fuera de servicio.



Foto 13. Ejemplo del corrimiento de un apoyo producto de la socavación en el estribo. Puente Orito (Putumayo)

Con respecto a las inspecciones visuales es necesario observar algunos indicios de problemas de socavación pasados o actuales. Esto consiste en revisar el estado de los terraplenes de acceso (Ver Foto 14) y asentamiento de la superestructura, al observar el estado de las barandas (Ver Foto 15).



Foto 14. Socavación y pérdida de la totalidad del material en el terraplén de acceso. Puente Cruce Yarumo (Putumayo)

3.3. Estudios especializados

Cuando se identifican problemas en el cauce por socavación, basados en las inspecciones principales y rutinarias, el ingeniero responsable recomienda un estudio hidrológico, hidráulico y de socavación (inspección especial) que determine las causas y las soluciones de los problemas de erosión y sedimentación que afectan al puente. Para esto el INVIAS sugiere seguir las recomendaciones del documento "Socavación y protección contra socavación" del manual de Inspección Especial de SIPUCOL y otras referencias. Se recomienda que dicho estudio contenga los siguientes aspectos mínimos: (Ver Tabla 3).



Foto 15. Indicios de la socavación en el terraplén de acceso. Puente Torcoragua
(Colapsado recientemente por socavación, con pérdidas de vidas humanas)

3.4. Reparaciones típicas y obras de rehabilitación

De acuerdo a los tipos de daños y problemas de socavación identificados en la inspección visual, se proyectan las obras de rehabilitación. Cuando es evidente la socavación y es probable el colapso del puente, se ejecutan obras inmediatas de emergencia provisionales, como construcción de recalce y muros en la base de la cimentación. Posteriormente se realiza un estudio especializado, para definir las obras definitivas que garanticen la seguridad del puente ante socavación a largo plazo.

Basado en las inspecciones realizadas en dos (2) periodos diferentes, empleando la metodología de

Estudios	Alcance mínimo
A. Topográfico	Levantamiento del sitio del ponedero. Alineamiento de las márgenes del cauce aguas arriba y aguas abajo con los niveles de aguas observados. Batimetrías aguas arriba y aguas abajo
B. Hidrológico, Hidráulico y Socavación	Recopilación de información Estudio Hidrológico: Mediante aforos y batimetrías se determina el caudal de diseño. Incluye un análisis de la cuenca hidrográfica, las precipitaciones, caudal máximo y el nivel de aguas máximas. Estudios Hidráulicos: Incluye: • Determinación de líneas de corriente para establecer su orientación y sus variaciones debidas a las presencias de obstáculos, meandros, zonas de depósito de materiales • Determinación de los sedimentos. Efecto de la reducción de la sección hidráulica. • Alineamiento de las pilas dentro del cauce. • Recomendación de obras de protección del cauce. Estudio geológico o geomorfológico: Incluye visitas a campo con mapas, fotografías aéreas y estudios anteriores; se hace un análisis detallado de los accidentes geológicos para una evaluación de la estabilidad del cauce. Cauce de la socavación: Mediante el análisis de la socavación local y global para un período de retorno de 50 años se determina los siguientes parámetros del sitio de ponedero: • Área hidráulica y longitud del puente. • Niveles de las aguas del cauce mínimos, medios y máximos. • Recomendación de protección de las márgenes. • Zonas de inundación.
C. Suelos y Geotécnicos	• Reconocimiento de campo y exploración esquemática. • Realización de sondeos, perforaciones o apiques. • Ensayos de laboratorio. • Capacidad de portante, estado de las cimentaciones y refuerzo de las cementaciones.
D. Estudio estructural	Patología de materiales: Mediante ensayos destructivos y no destructivos se debe evaluar las propiedades mecánicas, físicas y químicas de los componentes principales de la infraestructura. Análisis y revisión estructural: Con base en las especificaciones del Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (CCDSP) y utilizando programas de análisis, se debe hacer una revisión sismo-resistente del puente en general y de sus componentes principales, incluyendo las recomendaciones del estudio de suelos y las profundidades de socavación.
E. Diseño de obras de rehabilitación	Consiste en el análisis y diseño de las reparaciones que incluyan: mantenimiento, refuerzo y rehabilitación. Esta evaluación debe incluir un análisis beneficio-coste, especificaciones de construcción y presupuesto.

Tabla 3. Estudios para evaluar Socavación

SIPUCOL, se presentan las reparaciones estándar recomendadas por los ingenieros responsables para solucionar el problema generado por la socavación por erosión (Ver Tabla 4). Se aprecia que las obras más recomendadas son las de protección del cauce y el recauzamiento.

La inversión en obras de rehabilitación y refuerzo que el Invia a hecho ha sido importante para poder mantener la seguridad y el funcionamiento de los puentes. Entre las obras especiales más utilizadas en nuestro medio se encuentran: estabilización del suelo de fundación con micropilotes, pantalla de acero y concreto, recalces con concreto ciclópeo y reforzamiento con pilotes hincados. En algunos casos incluye obras de protección y control (reparaciones tipos A, y C) en las márgenes aguas arriba (Ver Foto 16 y Foto 17).

Tipo	1996-1997	2001-2002	Descripción
Renivelar	5,0%	4,9%	Revelación del cauce por medio de excavación y traslado de material del sitio sin importación de materiales. Compactación ligera
Reencauzamiento (rectificación)	39,7%	31,5%	Excavación para formar encauzamiento. Remoción de materiales
Protección del cauce	14,1%	12,6%	Formación del cauce a su forma apropiada. Instalación de protección de erosión con material apto como mampostería, enrocado o concreto
Gaviones	6,9%	11,0%	Renivelación y reformación de la zona afectada. Excavación para los gaviones, y colocación de los mismos siguiendo las especificaciones
Otra	34,2%	40,0%	

Tabla 4. Reparaciones típicas del cauce

4. Recomendaciones

Con el objeto de optimizar la priorización la contratación de los estudios y la rehabilitación en los puentes con este problema, se propone complementar

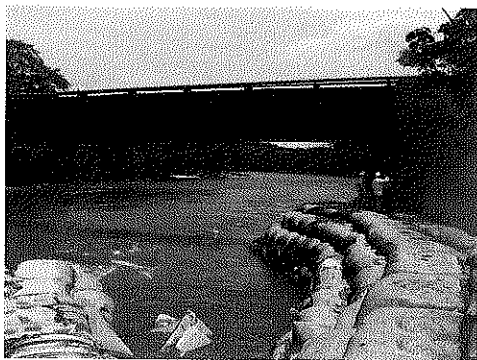


Foto 16. Obras de protección del estribo derecho aguas arriba.
Puente Orito

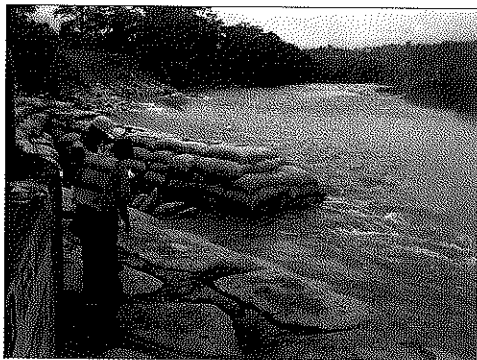


Foto 17. Espolones de bolsacretos para protección.
Puente Orito

- Riesgo bajo de socavación
- Susceptible a la socavación
- Puentes críticos
- Puentes con fundaciones desconocidas
- Puentes sobre lechos oceánicos

La vulnerabilidad a la socavación se define como “el grado para el cual el puente esta expuesto al ataque o daño por fuerzas y condiciones que causan socavación”. Existen diferentes metodologías disponibles para la estimación de la vulnerabilidad a la socavación, [Melville y Coleman (2000)], [Palmer y Otros (1997)], [Chen y otros (2000)], entre muchos otros, a partir de información limitada y sin un equipo interdisciplinario. De las metodologías revisadas, se recomienda la adaptación y el uso de un programa desarrollado por la Universidad de Washington, llamado CAESAR que es un sistema experto desarrollado en Visual Basic utilizando redes bayesianas mecanismo para el soporte lógico de decisiones. Este programa opera en ambiente Windows y está estructurado en el formato de preguntas y respuestas. Como entradas requiere de datos básicos del puente y de la inspección visual. Como resultados el programa arroja recomendaciones acerca de la vulnerabilidad del puente, estabilidad del cauce y adecuación del curso de agua.

a metodología de inspección visual específicamente en el tema de socavación y aumentar las labores de investigación.

Para estimar la socavación real en el puente se requiere de estudios especializados de hidrología, hidráulica y socavación o inspecciones bajo el agua que requieren de recursos importantes. La inspección visual es una herramienta inicial para el análisis y priorización de los puentes que se consideren vulnerables a la socavación que debe complementarse con estudios especializados in-situ. Una de las recomendaciones más completas en el tema de las inspecciones visuales para la socavación encontradas en la bibliografía disponible la realizó Kattel & Eriksson (1998) para el servicio forestal del Departamento de Agricultura de Estados Unidos. Basados en las inspecciones visuales realizadas en los puentes, se agrupan en cinco (5) categorías de acuerdo a su estado.

Incrementar las labores de investigación analítica y experimental. Se propone mejorar los laboratorios de hidráulica y empezar con la instrumentación de puentes principales (nuevos o existentes) para calibrar los diversos modelos de estimación de la socavación.

5. Conclusiones

La mayor causa de la falla de los puentes en Colombia (35%), es por socavación en la cimentación de las pilas, estribos y los terraplenes de acceso. Las entidades responsables de la infraestructura vial deben continuar con la evaluación general del efecto de la socavación de las estructuras más importantes localizadas en los ríos con mayores caudales y posibilidades de



socavación, basados en el estado del arte mundial en el tema. Además estas entidades deben exigir a las empresas consultoras, realizar estudios hidrológicos, hidráulicos y de socavación detallada y técnicamente sustentados, que tengan como mínimo los aspectos mostrados en la Tabla 3 de este documento. Además son responsables de la continuidad y el mejoramiento de los programas de inspección, mantenimiento y rehabilitación de los puentes.

La ingeniería nacional tiene la responsabilidad del desarrollo tecnológico en el tema de puentes, por lo que la Academia apoyada por el Estado y el sector privado, deben en forma urgente, investigar y profundizar en esta área.

SIPUCOL ha sido una herramienta muy importante y útil para mantener la seguridad y funcionamiento de los puentes de la Red Vial Nacional. Mediante este sistema se ha evitado diversos colapsos de puentes y ha solucionado parte del problema de la socavación de los mismos, por lo cual es esencial su continuidad, fortalecimiento y constante actualización.

Agradecimientos

Los autores expresan agradecimiento, por la revisión, el apoyo y la información suministrada por los ingenieros Luz Marina Trujillo y Libardo Santacruz, funcionarios del Instituto Nacional de Vías. Además al ingeniero Fabio Latorre Malagon, funcionario de la Empresa Colombiana de Petróleos quien contribuyó con su experiencia y diverso material fotográfico.

Edgar Eduardo Muñoz Díaz
Ingeniero Civil, Magíster en Ciencias de la Ingeniería
Jefe de la sección de estructuras del departamento de Ingeniería Civil
Grupo de Estructuras
Pontificia Universidad Javeriana
Bogotá D.C. Colombia

Civil Engineer, M.Sc.
Structural chief of Department of civil Engineering,
Structures Research Group
Pontificia Universidad Javeriana
Bogota D.C., Colombia
edgar.muñoz@javeriana.edu.co

Edgar Andrés Valbuena
Ingeniero Civil
Joven investigador
Grupo de Estructuras
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C. Colombia

Civil Engineer
Young Researcher
Structures Research Group
Pontifical Javeriana University
edgar.valbuena@javeriana.edu.co

12. Bibliografía

Chen, H.-L., et al. (2000), "Evaluation of scour and stream stability by using CAESAR", Final Report FHWA/IN/JTRP-2000/11, Purdue University, Indiana.

Fukui, J. and Otuka, M., (2000) "Development of the new Inspection Method on Scour Condition around Existing Bridge Foundations" Public Works Research Institute, Tsukuba, Japan.

Invias y DCD (1996), "Manual de inspección principal de Puentes", Proyecto Invias y Directorado de Carreteras de Dinamarca, Bogotá, Colombia.

Invias y DCD (1996a), "Manual de inspección especial de Puentes" Proyecto Invias y Directorado de Carreteras de Dinamarca, Bogotá, Colombia.

Invias y DCD (1996b), "Base de datos - SIPUCOL - 1996" Proyecto Invias y Directorado de Carreteras de Dinamarca, Software v1.0, Bogotá, Colombia.

Invias y DCD (2001), "Base de datos - SIPUCOL - 2001", Proyecto Invias y Directorado de Carreteras de Dinamarca, Software v2.0, Bogotá, Colombia.

Kattell, J., and Eriksson, M., (1998) "Bridge Scout Evaluation; Screening, Analysis & Countermeasures", report prepare for the USDA Forest Services and Cooperating Federal and State agencies, United States. 21p.

Kelly, S.W., (1999) "Underwater Inspection Criteria", Naval Facilities Engineering Service Center, paper prepared for the California State Lands Commission, United States.

Lagasse, P.F., et al. (2001), "Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures - Experience, Selection, and Design Guidelines, Hydraulic Engineering Circular No. 23 (HEC 23), Second Edition, FHWA NHI 01-003, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

Lagasse, P.F., J.D Schall, and E.V Richardson, 2001, "Stream Stability at Highway Structures", Hydraulic Engineering Circular No. 20 (HEC 20), Third Edition, FHWA NHI 01-002, Federal Highway Administration, Washington, D.C.

Melville, B. W., and Coleman, S.E., (2000), "Bridge Scour", Water Resources Publication, LLC, 550p.

Muñoz, E.E. (2001), "Estudio de las causas del colapso de algunos puentes de Colombia". Ingeniería y Universidad, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.

Muñoz, E.E, Valbuena, E.A., y Hernandez, R., (2004), "Estado y daños típicos de los puentes de la red vial nacional de Colombia,

basados en inspecciones visuales". Rutas, Número 104, Septiembre-Octubre, España.

Muñoz, E.E., (2000), "Estadística de las causas de falla de puentes en Colombia" Apuntes de clase Ingeniería de puentes. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. P 14 -15.

Muñoz, E.E., y Valbuena, E.A., (2004), "Evaluación del estado de los puentes de acero de la red vial de Colombia". Revista Internacional de desastres naturales e infraestructura civil, Volumen 4 No. 2 Diciembre, Puerto Rico.

Palmer, R.N, et. al., (1997) "CAESAR: Catalog and Expert Evaluation on Scour Risk and River Stability at bridge Site". Report 426 National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). National Academy Press, Washington D.C.

Richardson, E.V., and Lagasse, P.F., (1999) "Stream Stability and Scour at Highway Bridges", Compendium of Stream Stability and Bridge Scour Papers presented at American Society of Civil Engineers Hydraulics Division Conferences 1991 to 1998, A.S.C.E, 1036p.

Richardson, E.V., and S.R Davis (2000) "Evaluating Scour At Bridges", Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC 18), Fourth Edition, FHWA NHI 01-001, Federal highway Administration, Washington D.C.

Shen, H.W., et al. (1969) "Local Scour Around Bridge Piers", Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 95, No. HY6.

Valbuena, E.A., y Salgar, A.A., (2003) "Guía práctica para la estimación de la socavación de cauces bajo puentes", Tesis de Grado (Meritoria) para optar al título de Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Javeriana, 230p.

Works Consultancy Services (1990) "Wairoa bridge failure: Assessment of total costs", Report for Transit New Zealand, Wellington, New Zealand.

25

ara

